

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

В.о.завідувача кафедри

_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні
технології екологічної безпеки»**

**зі спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна
техніка»**

**на тему: «Інформаційна вимірювальна технологія контролю твердих
часток у газових викидах промислових підприємств»**

Виконала:

студентка II курсу, групи ПН-з91мп

Довга Олена Володимирівна _____

Керівник:

професор, д.т.н.

Зашепкіна Наталія Миколаївна _____

Консультант з назва розділу:

доцент д.е.н

Бояринова Катерина Олександрівна, _____

Консультант із нормконтролю:

доцент к.т.н.,

Божко Костянтин Михайлович _____

Рецензент:

старший викладач к.т.н.

Богдан Галина Анатоліївна _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань
Студент _____

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Приладобудівний факультет

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Освітньо-професійна програма Інформаційні вимірювальні технології екологічної безпеки

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

«__» _____ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Довгій Олені Володимирівні

1. Тема дисертації «Інформаційна вимірювальна технологія контролю твердих часток у газових викидах промислових підприємств», науковий керівник дисертації Зашепкіна Наталія Миколаївна, професор, д.т.н., затверджена наказом по університету від “__” _____ 2020 р. № ____
2. Термін подання студентом дисертації “3” грудня 2020 р.
3. Об’єкт дослідження – конструктивні особливості напівпровідникових фотодетекторів придатних для визначення оптичних характеристик твердих часток атмосферного повітря та потужні світлодіоди у якості джерел освітлення для використання в спектроскопії видимої області спектру.
4. Вихідні дані – процес контролю твердих часток атмосферного повітря розробленим в рамках досліджень макетом вимірювальної установки.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - 5.1 Теоретичні дослідження.
 - 5.1.1. Огляд об’єкту дослідження.
 - 5.1.2. Огляд та характеристика існуючих в даний час хімічних, фізичних та фізико-хімічних методів діагностики інформативних показників твердих часток атмосферного повітря, визначення їх переваг та недоліків;
 - 5.1.3. Аналіз проблеми реєстрації електромагнітного випромінювання вибраного спектрального діапазону;

5.1.4. Провести аналіз сучасних методик та засобів реєстрації електромагнітного випромінювання з використанням фотодіодних первинних перетворювачів;

5.1.5. Виконати дослідження факторів, які визначають похибку вимірювань параметрів світлового потоку первинним перетворювачем та формування сигналу вимірювальної інформації в аналоговій формі на його виході;

5.1.6. Визначення функції перетворення вимірювального макету;

5.2 Експериментальні дослідження:

5.2.1 Апробація макету вимірювальної установки із напівпровідниковим фотодетектором придатним для визначення оптичних характеристик твердих часток атмосферного повітря та потужних світлодіодів у якості джерел освітлення для використання в спектроскопії видимої області спектру.

5.2.2. Виконання метрологічного забезпечення вимірів. Розгляд похибок та методик повірки вимірювального засобу.

5.2.3 На базі навчально-наукових лабораторій кафедри ІВТ виконати аналіз та узагальнення результатів, отриманих при проведенні досліджень.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

6.1 Номограма для визначення швидкості витання частинок;

6.2 Оптична схема вимірювача твердих часток у газових викидах промислових підприємств;

6.3 Структурна схема вимірювача;

6.4 Зовнішній вигляд та схема застосування аналізатору для контролю твердих часток у газових викидах промислових підприємств;

6.5 Складальне креслення блоку випромінювача вимірювача дисперсних часток у викидах промислових підприємств;

6.6 Структурна схема установки для градуювання пиломірів;

7. Перелік публікацій:

7.1 Підготувати 2 доповіді на конференції із публікацією тез, 2 статті.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1. Фізико-хімічні особливості об'єкту аналізу	Зашепкіна Н.М, професор, д.т.н.	10.09.2020	30.09.2020
Розділ 2. Методи вимірювання концентрації твердих часток в промислових викидах	Зашепкіна Н.М, професор, д.т.н.	23.09.2020	12.10.2020
Розділ 3. Розробка макету вимірювальної установки та апробація методики вимірювань	Зашепкіна Н.М, професор, д.т.н.	01.10.2020	16.11.2020
Розділ 4. Стартуп проект «Удосконалення контролю вимірювання твердих часток у газових викидах промислових підприємств»	Бояринова К.О., к.е.н, доцент	16.09.2020	22.10.2020
Консультант із нормконтролю:	Божко К. М., к.т.н., доцент	10.09.2020	08.12.2020

9. Дата видачі завдання 10 вересня 2020 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Науковий огляд та аналіз існуючих приладів для вимірювання концентрації твердих часток	до 21.09.2020 р.	виконано
2	Розробка схеми структурної приладу, опис її дії та основних елементів і вузлів	до 25.09.2020 р..	виконано
3	Конструювання вузлів і деталей	до 05.10.2020 р.	виконано
4	Проведення метрологічного забезпечення приладу	до 15.10.2020 р.	виконано
5	Стартуппроект	до 24.10.2020 р.	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	до 11.11.2020 р.	виконано
7	Написання анотації та оформлення роботи в цілому	до 25.11.2020 р.	виконано

Студент

Олена ДОВГА

Науковий керівник

Наталія ЗАЩЕПКІНА

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Більшу частину промислових викидів становить пил. Пилом називають дисперсну систему, що складається із дрібних твердих часток, що перебувають у газовому середовищі у зваженому стані. Промисловий пил утворюється в результаті виробничих процесів. Пил в газах, що відходить від цементних і сировинних сушарок, млинів, печей випалення колчедану, в аспіраційному повітрі пневмотранспортних пристроїв і т. д., є наслідком здійснення механічних процесів подрібнення твердих тіл (дроблення, розмелювання, перемішування, стирання та ін.), пересипки і транспортування сипких матеріалів. У димових, генераторних, доменних, коксівних і інших подібних газах міститься пил, що утворюється в процесі горіння палива [1-5].

Тому необхідним є застосування засобів та методів контролю твердих фракцій атмосферного повітря в промислових викидах. Такі вимірювання проводяться спеціальними приладами – пиломірами різного конструктивного виконання і способів реєстрації вимірювальної інформації.

Метою магістерської дисертації є розробка вимірювальної технології контролю твердих часток атмосферного повітря та апробація вимірювального макету, який містить малощумний фотодіод у якості первинного перетворювача та потужні світлодіоди – у якості джерела освітлення, призначені для використання в спектроскопії видимої області спектру. Більшу частину промислових викидів становить пил. Пилом називають дисперсну систему, що складається із дрібних твердих часток, що перебувають у газовому середовищі у зваженому стані. Промисловий пил утворюється в результаті виробничих процесів. Пил в газах, що відходить від цементних і сировинних сушарок, млинів, печей випалення колчедану, в аспіраційному повітрі пневмотранспортних пристроїв і т. д., є наслідком здійснення механічних процесів подрібнення твердих тіл (дроблення, розмелювання, перемішування, стирання та ін.), пересипки і транспортування

сипких матеріалів. У димових, генераторних, доменних, коксівних і інших подібних газах міститься пил, що утворюється в процесі горіння палива [1-5].

Тому необхідним є застосування засобів та методів контролю твердих фракцій атмосферного повітря в промислових викидах. Такі вимірювання проводяться спеціальними приладами – пиломірами різного конструктивного виконання і способів реєстрації вимірювальної інформації.

Об'єкт дослідження – напівпровідникові фотодетектори, які використовуються для визначення оптичних характеристик твердих часток атмосферного повітря та потужні світлодіоди у якості джерел освітлення для спектроскопії видимої області спектру.

Предметом дослідження є процес контролю твердих часток в атмосферному повітрі, який проводиться в рамках досліджень за допомогою макету вимірювальної установки.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні **завдання**:

- Огляд та характеристика існуючих в даний час хімічних, фізичних та фізико-хімічних методів діагностики інформативних показників твердих часток атмосферного повітря, визначення їх переваг та недоліків;

- Аналіз проблеми реєстрації електромагнітного випромінювання вибраного спектрального діапазону;

- Провести аналіз сучасних методик та засобів реєстрації електромагнітного випромінювання з використанням фотодіодних первинних перетворювачів;

- Виконати дослідження факторів, які визначають похибку вимірювань параметрів світлового потоку первинним перетворювачем та формування сигналу вимірювальної інформації в аналоговій формі на його виході;

- Визначення функції перетворення вимірювального макету;

- Апробація макету вимірювальної установки із напівпровідниковим фотодетектором придатним для визначення оптичних характеристик твердих

часток атмосферного повітря та потужних світлодіодів у якості джерел освітлення для використання в спектроскопії видимої області спектру.

Методи дослідження. Для контролю твердих часток у викидах промислових підприємств пропонується до застосування оптичний метод у видимому спектральному діапазоні випромінювання, однопроменева оптична система вимірювача з подальшим розділенням на два світлові потоки – вимірювальний та порівнювальний.

Наукова новизна роботи полягає в розробці вимірювальної технології контролю твердих часток атмосферного повітря шляхом використання вимірювального макету в спектроскопії видимої області спектру.

Практична цінність роботи — в можливості та комфортному вимірюванні складу твердих часток в повітрі без пробовідбору при повній автоматизації процесу вимірювання. Він дозволяє проводити безперервні вимірювання й визначати миттєві значення концентрації твердих часток.

Апробація роботи. За результатами роботи було виконані та надруковані наступні публікації, що знаходяться в додатку А–Г:

1. Артемчук В.І. Контроль виходу метану у біоенергетичному виробництві / О.В. Довга, В.В. Юник // Вісник Хмельницького національного університету, серія «Технічні науки». – 2020. – №5. – С.7-13.

2. Защепкіна Н.М. Програмний додаток контролю дисперсності розчинів. / Д.С. Мельниченко, О.В. Довга // XIX Міжнародна науково-технічна конференція“ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 13–14 травня 2020 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна, – 2020 р. ст. – 80-81.

Структура та обсяг роботи. Робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, 35 рисунків, 26 таблиць, списку використаних джерел із 28 позицій. Загальний обсяг роботи – 118 сторінки, з яких основна частина викладена на 121 сторінках.

Ключові слова: тверді частки, пилогазове середовище, концентрація, оптична густина, блок випромінювача, оптичний метод.

ABSTRACT

Relevance of the topic. Most of the industrial emissions are dust. Dust is a dispersed system consisting of small solid particles that are in a suspended state in a gas environment. Industrial dust is formed as a result of production processes. Dust in gases escaping from cement and raw material dryers, Mills, pyrite firing furnaces, in the aspiration air of pneumatic transport devices, etc., is a consequence of the mechanical processes of grinding solids (crushing, grinding, mixing, abrasion, etc.), pouring and transporting bulk materials. Smoke, Generator, blast furnace, coking and other similar gases contain dust generated during fuel combustion [1-5].

Therefore, it is necessary to use means and methods for controlling solid fractions of atmospheric air in industrial emissions. Such measurements are carried out by special devices – dust meters of various designs and methods of recording measurement information.

The purpose of the master's thesis is to develop a measurement technology for monitoring atmospheric particulate matter and test a measurement layout containing a low – noise photodiode as a primary converter and high-power LEDs as a lighting source designed for use in visible spectrum spectroscopy. Most of the industrial emissions are dust. Dust is a dispersed system consisting of small solid particles that are in a suspended state in a gas environment. Industrial dust is formed as a result of production processes. Dust in gases escaping from cement and raw material dryers, Mills, pyrite firing furnaces, in the aspiration air of pneumatic transport devices, etc., is a consequence of mechanical processes of grinding solids (crushing, grinding, mixing, abrasion, etc.), pouring and transportation bulk materials. Smoke, Generator, blast furnace, coking and other similar gases contain dust generated during fuel combustion [1-5].

Therefore, it is necessary to use means and methods for controlling solid fractions of atmospheric air in industrial emissions. Such measurements are carried out by special devices – dust meters of various designs and methods of recording measurement information.

The object of research is Semiconductor photodetectors, which are used to determine the optical characteristics of solid particles of atmospheric air and high – power light diodes as lighting sources for spectroscopy of the visible region of the spectrum.

The subject of the study is the process of monitoring solid particles in atmospheric air, which is carried out as part of research using a mock-up of a measuring unit.

To achieve this goal the **following tasks** were formulated:

- Review and characteristics of currently existing chemical, physical and physico-chemical methods for diagnosing informative indicators of atmospheric solid particles, determining their advantages and disadvantages;
- Analysis of the problem of recording electromagnetic radiation of the selected spectral range;
- Analyze modern methods and means of recording electromagnetic radiation using photodiode primary converters;
- Perform a study of factors that determine the measurement error of light flux parameters by the primary converter and the formation of a measurement information signal in analog form at its output;
- Defining the measurement layout conversion function;
- Testing of the layout of a measuring unit with a semiconductor photodetector suitable for determining the optical characteristics of solid particles atmospheric air particles and high-power light diodes as lighting sources for use in visible spectrum spectroscopy.

Research methods. To control solid particles in the emissions of industrial enterprises, an optical method in the visible spectral range of radiation, a single – beam optical system of the meter is proposed for use, followed by separation into two light fluxes-measuring and comparing.

The scientific novelty of the work consists in the development of a measurement technology for monitoring solid particles of atmospheric air by using a measurement layout in visible spectrum spectroscopy.

The practical value of work lies in the possibility and comfortable measurement of the composition of solid particles in the air without sampling, while fully automating the measurement process. It allows you to make continuous measurements and determine instantaneous values of the concentration of solid particles.

Testing of the work. Based on the results of the work, the following publications were completed and published, which are located in Appendix A-G:

1.Artemchuk V. I., Dovga O. V., Unik V. V. control of methane output in bioenergetic production / / Bulletin of Khmelnytsky National University, Series "Technical Sciences". - 2020. - №5. - pp. 7-13.

2.Zashepkina N. M. software application for controlling the dispersion of solutions. / D. S. Melnichenko, O. V. Dovga / / XIX International Scientific and technical conference "instrumentation: state and prospects", May 13-14, 2020, Igor Sikorsky KPI, Kiev, Ukraine, -2020 art. – 80 – 81.

Structure and scope of work. The paper consists of an introduction, three sections, conclusions, 35 Figures, 26 tables, and a list of sources used from 28 positions. The total amount of work is 121 pages, of which the main part is laid out on 118 pages.

Keywords: solid particles, dust and gas medium, concentration, optical density, emitter block, optical method.

ЗМІСТ

ВСТУП	15
РОЗДІЛ 1 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОБ'ЄКТУ АНАЛІЗУ	16
1.1 Огляд об'єкту аналізу джерела забруднення повітря.....	16
1.2. Способи визначення фізико-хімічних властивостей твердих часток.....	19
1.3. Щільність твердих часток	20
1.4. Дисперсний склад твердих часток атмосферного повітря	23
1.5. Питомий електричний опір.....	23
Висновки до розділу 1	24
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ТВЕРДИХ ЧАСТОК В ПРОМИСЛОВИХ ВИКИДАХ.....	25
2.1 Методи вимірювання концентрації твердих часток, засновані на попередньому їх осадженні.....	25
2.1.1 Ваговий метод	25
2.1.2 Радіоізотопний метод	26
2.2. Оптичні методи	31
2.2.1. Фотометричний метод.....	32
2.2.2 Люмінесцентний метод	35
2.3. П'єзоелектричний метод.....	36
2.4. Метод механічних вібрацій.....	38
2.5. Метод, заснований на вимірюванні перепаду тисків на фільтрі.....	41
2.6. Методи вимірювання концентрації твердих часток без попереднього їх осадження.....	42
2.6.1. Абсорбційний метод	42
2.6.2. Метод інтегрального світлорозсіювання.....	44
2.6.3. Голографічний метод.....	49
2.7. Електричні методи контролю дисперсних часток.....	51
2.7.1 Контакт-електричний метод	51
2.7.2. Ємнісний метод	54
2.7.3. П'єзоелектричний метод.....	57

	13
2.8. Акустичний метод.....	60
Висновки до розділу 2.	63
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МАКЕТУ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ТА АПРОБАЦІЯ МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАНЬ.....	64
3.1 Аналітичний огляд сучасних приладів для вимірювання концентрації твердих часток в промислових викидах	65
3.1.1. Огляд переносного вимірювача запиленості Gravimat SHC500	65
3.1.2. Лазерний вимірювач запиленості Dusthunter T200	67
3.1.3. Оптичний вимірювач запиленості FWE 200	68
3.1.4. Аналітичний огляд вимірювача концентрації пилу DR 300-40 .	70
3.1.5. Функціональні особливості стаціонарного вимірювача контролю запилених газових потоків ПІКП–Т	71
3.2 Огляд патентної інформації для розробки пиломіра.....	72
3.2.1 Пристрій для вимірювання запиленості газів	72
3.2.2. Оптичний детектор аерозолів	74
3.2.3 Прилад для вимірювання маси і рахункової концентрації часток в потоці рідини або газу	75
3.2.4. Портативний оптичний пиломір	76
3.2.5. Цифровий вимірювач концентрації пилу	77
3.3. Вибір функціональної схеми і розрахунок вузлів вимірювача	78
3.3.1. Вибір спектральної області вимірювання	81
3.3.2. Вибір фотоприймача.....	83
3.3.3. Розрахунок оптичної схеми блоку випромінювача.....	84
3.4. Розрахунок функції перетворення вимірювача	90
3.5. Метрологічне забезпечення вимірювань	94
3.6. Визначення похибки пиломіру	96
3.7. Методики проведення перевірки пиломіра	98
Висновки до розділу 3	100

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ІНФОРМАЦІЙНА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ КОНТРОЛЮ ТВЕРДИХ ЧАСТОК У ГАЗОВИХ ВИКИДАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ»	102
4.1 Опис ідеї проекту	102
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	104
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту	106
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	112
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	114
Висновки до розділу 4	117
ВИСНОВКИ.....	119
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	120

ВСТУП

Сучасний світ насичений промисловими підприємствами з шкідливими викидами, що загрожують безпеці людей і загалом всього живого на Землі, необхідно дуже жорстко і точно контролювати параметри викидів в атмосферу.

Повітря має першорядне значення для живих організмів, причому не тому що вони тільки живуть у повітряному середовищі, а тому що воно є газовим компонентом ґрунту, розчинений у природних водах і тканинних рідинах організмів. Склад повітря, позбавлений вологи і твердих домішок, практично однаковий у всіх місцевостях Землі.

Газовий склад повітря відрізняється великою сталістю як протягом доби, так і в різні періоди року [1]. Це обумовлено великою швидкістю дифузії його компонентів, сталістю їхнього поновлення в біосфері, інтенсивним перемішуванням його шарів і величезною масою атмосфери. У промисловості в результаті переробки різної сировини і напівфабрикатів шляхом механічної, термічної і хімічної дії на них, утворюються промислові гази в яких містяться зважені частки.

Вимірювання концентрації пилу є складним метрологічним завданням. Це обумовлене тим, що пил являє собою складну систему, яку, на противагу газоподібному середовищу, не можна описати в достатньому ступені одним або двома параметрами.

Насамперед, пил майже завжди є полідисперсною системою, тобто характеризується широким спектром розмірів часток (від 10^{-2} до 10^2 мкм). Інтервал концентрацій являється ще більш широким (від 10^{-8} до 10^5 мг/м³) [8]. Крім того, форма й фізико-хімічні властивості часток пилу можуть бути найрізноманітнішими. Тому необхідно вміти вимірювати концентрацію твердих часток у різних видах промислових викидах.

РОЗДІЛ 1 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОБ'ЄКТУ АНАЛІЗУ

Дисперсний склад атмосферного повітря є одним із найважливіших показників, що визначає його фізико-хімічні властивості.

У техніці пиловловлювання і очищення газів дисперсний склад атмосферного повітря має вирішальне значення, оскільки основне коло питань за розрахунком і вибором устаткування пов'язаного із цим параметром призначено для уловлюванню пилу.

1.1 Огляд об'єкту аналізу джерела забруднення повітря

Основним джерелом забруднення повітряного басейну є промислові підприємства. Більшу частину промислових викидів становить пил.

Пилом називають дисперсну систему, що складається із дрібних твердих часток, що перебувають у газовому середовищі у зваженому стані. Пил можна класифікувати на атмосферний і промисловий. Промисловий пил утворюється в результаті виробничих процесів. Атмосферний пил включає промисловий (забруднення атмосферного повітря викидами промислових підприємств) і природний, що виникає при вивітрюванні гірських порід, вулканічних виверженнях, пожежах, вітровій ерозії орних земель, пилу космічного й біологічного походження (пилок рослин, спори, мікроорганізми). Атмосферний пил відрізняється більшою різноманітністю часток, розміри яких у більшості випадків менше розмірів часток промислового пилу.

Пил в газах, що відходить від цементних і сировинних сушарок, млинів, печей випалення колчедану, в аспіраційному повітрі пневмотранспортних пристроїв і т. д., є наслідком здійснення механічних процесів подрібнення твердих тіл (дроблення, розмелювання, перемішування, стирання та ін.), пересипки і транспортування сипких матеріалів. У димових, генераторних, доменних, коксівних і інших подібних газах міститься пил, що утворюється в процесі горіння палива.

Як продукт неповного згоряння органічних речовин і палива при нестачі повітря утворюється сажа. Якщо в газах містяться будь які речовини

в пароподібному стані, то при охолодженні до певної температури пари конденсуються і переходять в рідкий або твердий стан.

Прикладами суспензій, що утворилися шляхом конденсації, можуть служити: туман сірчаної кислоти в відведених газах випарних апаратів, туман смол в генераторних і коксових газах, пил кольорових металів (цинку, олова, свинцю, сурми та ін.) з низькою температурою випаровування в газах.[1]

Гази (в тому числі і повітря), які містять зважені частки, відносяться до аеродисперсних систем. Дисперсними прийнято називати системи, що складаються з дрібнорозділених частинок (дисперсна фаза), розподілених в якому – не будь дисперсійному середовищі (воді, розчиннику, повітрі).

Аеродисперсними системами, або аерозолями, називають системи, в яких дисперсійним середовищем є газ, а дисперсною фазою – тверді (пил) або рідкі (туман) частинки. Дисперсна фаза може складатися із частинок однакового розміру (монодисперсна система) або з частинок різного розміру (полідисперсна система).

Промислові гази зазвичай представляють собою складні аеродисперсні системи, в яких дисперсійне середовище є сумішшю різних газів, а зважені частки полідисперсні і мають різний агрегатний стан.

Зважені частки в залежності від розміру розподіляються на фракції. Розмір зважених частинок виражається найчастіше в мікрометрах (мкм). Іноді частинки класифікують за швидкістю витання (у тих випадках, коли склад пилу визначають методом повітряної класифікації), а їх діаметр визначають за номограмою (рис. 1.1).

Фракцією називають масову частку частинок, розміри яких знаходяться в інтервалі значень, прийнятих в якості нижнього і верхнього меж. Частинку довільної форми умовно вважають кулястої, а її розмір визначають за еквівалентним діаметром. Пил, наприклад, містить частинки розміром до 100 мкм, його можна розділити на фракції. Кількість фракцій та їх особливості наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Фракції викидів промислових підприємств та їх особливості [9].

Номер фракції	1	2	3	4	5
Розмір частинок, мкм	0 – 5	>5 – 10	>10 – 15	>15 – 20	>20 – 30
Номер фракції	6	7	8	9	
Розмір частинок, мкм	>30 – 40	>40 – 60	>60 – 90	>90 – 100	

У більшості випадків зважені в газах частки мають позитивний чи негативний електричний заряд. Пил заряджаються в процесі дроблення або розпилення матеріалу, при терті або контакті з поверхнею обладнання та комунікації, русі через розжарене середовище (зарядження іонами в результаті термоіонної або фотоелектричної емісії електронів).

Дими заряджаються при русі через розпечені середовища в результаті полум'я, термоіонію і фотоелектричної емісії електронів. Тумани заряджаються через розпилювання, при барботуванні газів через рідини.

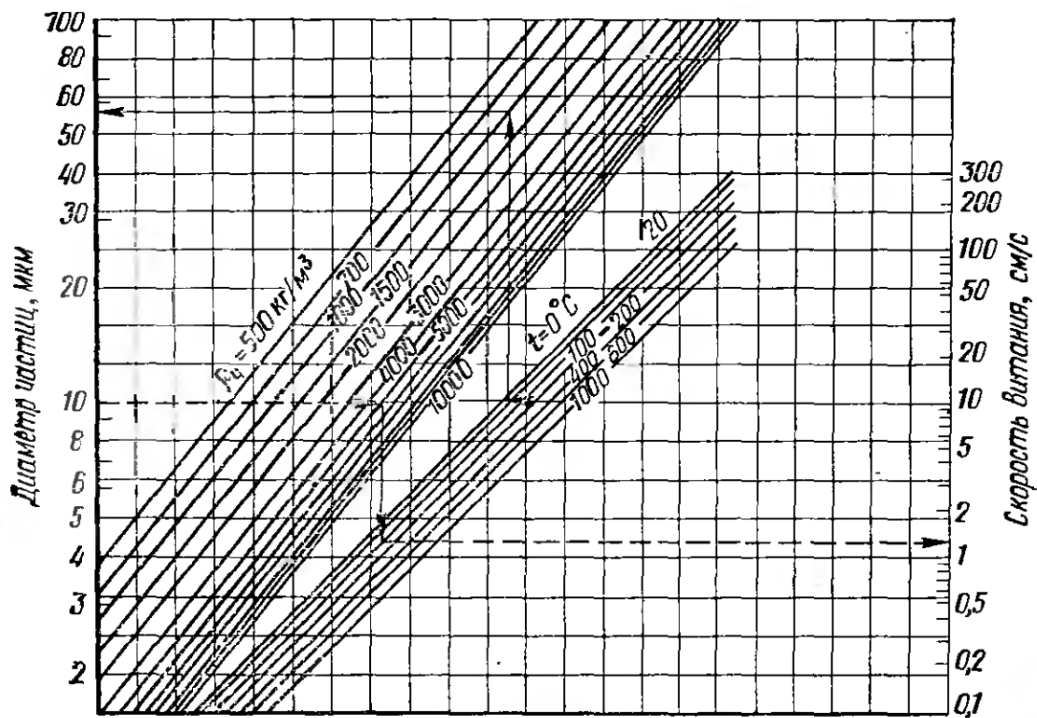


Рис 1.1 – Номограма для визначення швидкості витання частинок

Крім того, зважені частинки можуть заряджатися в результаті хімічних реакцій, під дією рентгенівського або радіоактивного випромінювання та електричної індукції. Цей природний електричний заряд зважених часток умовно називається трібозаряд. Число позитивно заряджених частинок в аерозолях може дорівнювати числу негативно заряджених, що, як правило, спостерігається для вельми дрібних частинок при однорідному хімічному їх складі.

У ряді випадків переважають частинки, що несуть заряд одного знака. Седиментаційною швидкістю частинки називається швидкість осідання, яку набуває частка в спокійному середовищі під впливом сили тяжіння. Ця швидкість залежить від розміру частки, її форми і щільності, а також від щільності і в'язкості середовища.

Седиментаційним діаметром частки називається діаметр кулі, швидкість осідання та щільність якого відповідно рівні швидкості осідання та щільності частки неправильної форми[2-6].

1.2. Способи визначення фізико-хімічних властивостей твердих часток

Ефективна і надійна робота пиловловлюючого устаткування в значній мірі залежить від фізико – хімічних властивостей пилогазового потоку. При проектуванні і оцінці роботи апаратів і систем пиловловлювання необхідно враховувати ряд властивостей такою, що підлягає уловлюванню пилу. У роботі [5] запропонована класифікація пилу, яка передбачає ділення властивостей і відповідних характеристик пилоподібних матеріалів на чотири групи.

До першої групи відносяться властивості речовини, з якої складаються частки: хімічний склад речовини, його пружність, твердість, щільність, електропровідність, діелектричні і магнітні властивості, гігроскопічність, розчинність. Другу групу складають властивості індивідуальних часток. Сюди відносяться геометричні параметри – розмір, форма, шорсткість і поверхневі властивості матеріалу, з якого складаються частки. Поверхневі

властивості і геометричні параметри поряд з властивостями матеріалу впливають на сили аутогезії і сили тертя в індивідуальних контактах.

До третьої групи входять властивості пилоподібного матеріалу як сукупності кількості часток. Ці властивості не залежать від щільності часток. Аутогезійна здатність часток і дисперсний склад визначають аутогезійну здатність пилоподібного матеріалу, тобто його здатність протистояти розтягуючим навантаженням за рахунок сил аутогезії. Цю характеристику називають також коефіцієнтом злипання пилу. Її можна кількісно характеризувати по міцності на розрив шару пилу, ущільненого стандартним навантаженням (50 кПа).

Фракційні властивості часток і дисперсний склад визначають внутрішнє тертя пилоподібного матеріалу, від якого залежать умови течії і руйнування пилових шарів. Для грубодисперсних матеріалів внутрішнє тертя вичерпно характеризується кутом внутрішнього тертя і зчепленням шару.

Існує ряд характеристик, що відображають специфічну поведінку пилу як дисперсного матеріалу в конкретних пиловловлювачах. До таких технологічних характеристик відносяться щільність пилу, кут природного укусу, кут обвалення, швидкість виділення з воронки, максимальний сводоутворюючий розмір отвору, здатність до псевдозрідження, розпиленість, грудкуванням, злежуваністю.

В четверту групу входять властивості пилового шару, сформованого з даного пилоподібного матеріалу. Специфічними характеристиками пилового шару є щільність упаковки часток і міцність контактів між частками. Вони залежать від властивостей пилоподібного матеріалу і умов формування шару при механічній фільтрації (рукавні фільтри, зернисті фільтри), електричній фільтрації (електрофільтри) і ін.

1.3. Щільність твердих часток

Це одна з найважливіших характеристик, від якої залежить ефективність роботи пиловловлювачів. Розрізняють:

- істинну щільність (маса одиниці об'єму часток, що не мають пор);

- щільність (маса одиниці об'єму часток, включаючи об'єм закритих пор);
- об'ємну щільність (маса одиниці об'єму частини: включаючи об'єм закритих і відкритих пор);
- насипну щільність (маса одиниці об'єму уловленого пилу, вільно насипаного будь – яку ємність безпосередньо після її заповнення. У об'єм входять внутрішні пори часток і проміжний простір між ними);
- насипну щільність при струшуванні (маса одиниці об'єму пилу при самій щільній упаковці часток, що досягається шляхом струшування).

За даними про щільність часток визначають седиментаційний діаметр часток, насипну щільність для розрахунку і вибору об'єму бункерів і пилевигрузних пристроїв. Щільність пилу визначають тільки після відділення її часток від газового середовища. Методики визначення щільності уловленого пилу і порошкоподібного матеріалу ідентичні і детально викладені в [6].

Якщо пил отриманий шляхом подрібнення моноліту, то щільність матеріалу часток збігається з дійсною щільністю. Частки промислового пилу, що утворюється в результаті термічної обробки, гранулюванні, сушки і інших процесів, мають закриті пори, з яких удається видалити газові включення. Щільність таких часток відповідає уявній щільності.

Промисловий пил може складатися з часток як однакової, так і різної щільності. До першого вигляду відносяться, наприклад, кварцевий, корундовий пил або хімічно чисті солі, до другого – летюча зола, в грубих фракціях якої є не згорілі частки палива, а в тонких – підвищена кількість солей кальцію і лужних металів.

Залежно від величини фракції можуть містити частки різної структури. Так, в грубих фракціях силікагеля і синтетичних миючих порошоків містяться незруйновані порожнисті частки, а в тонких – зруйновані, такі, що мають іншу структуру і відповідно іншу уявну щільність. У тих випадках, коли

щільність різних по величині часток істотно розрізняється, пил необхідно розділити на фракції, і при обчисленні седиментаційного діаметру потрібно приймати для окремих фракцій відповідні значення щільності.

Для розрахунків, пов'язаних з вибором або оцінкою роботи пилеуловлювачів, потрібні відомості про уявну щільність, знайдену для всієї сукупності часток в пробі. Такі дані можна отримати методом пікнометрії із застосуванням рідини, не змоченої часточки і, отже, що не заповнює наявні в них пори.

Пікнометричний спосіб заснований на визначенні об'єму рідини, витисненим пилом, маса якого відома. Приватне від ділення маси проби на витиснений нею об'єм є щільність пилу.

Вживана рідина не повинна взаємодіяти з пилом. Тому доцільно використовувати рідину для дисперсійного аналізу рідинним седиментометричним методом. Методика проведення аналізу пікнометричним способом викладена в [6].

Насипна щільність визначається відношенням маси свіжонасипаних твердих часток до займаного ними об'єму з врахуванням повітряних проміжків між частками. Величиною насипної щільності користуються для визначення об'єму бункерів пиловловлювачів, а також при виборі систем транспортування уловленого пилу (шнеки, пневмонасоси і ін.). Із збільшенням однорідності часток по розмірам їх насипна щільність зменшується, оскільки збільшується відносний об'єм повітряних прошарків.

Встановлено, що насипна маса пилу, що злежався, в 1,2 – 1,5 рази більше, ніж свіжонасипаний, отже, він займає об'єм в 0,7 – 0,9 разу менше первинного [7].

Уявна щільність гладких монолітних часток збігається з істинною, очевидно, такі частки краще уловлюватимуться в сухих пиловловлювачах (циклонах, рукавних фільтрах, електрофільтрах), чим пористі, оскільки при однаковій масі вони в меншій кількості схильні до винесення з газовим потоком з апарату.

Залежно від міри гідратації пилу уявні величини щільності і насипної, можуть розрізнятися в 2-3 рази.

1.4. Дисперсний склад твердих часток атмосферного повітря

Дисперсний склад є одним з найважливіших характеристик тонкоподрібнених матеріалів, що визначають їх фізико – хімічні властивості. У техніці пиловловлювання і очищення газів дисперсний склад пилу має вирішальне значення, оскільки основний круг питань за розрахунком і вибором устаткування пов'язаний з цим параметром, що підлягає уловлюванню пилу.

Дисперсним (зерновим, гранулометричним) складом пилу називається характеристика складу дисперсної фази по розмірах або швидкостях осідання часток. Вона показує, яку долю по масі, об'єму, поверхні або числу часток складають частки в будь-якому діапазоні їх розмірів або швидкостей осідання. Дисперсний склад може бути виражений у вигляді таблиці, кривої або формули розподілу часток пилу.

Мірою дисперсності є якісний показник, що характеризує «тонкість» пилу. Як умовні показники цієї ж властивості використовуються питома поверхня, середній діаметр часток, медіанний діаметр і інші величини [8].

1.5. Питомий електричний опір

Величина питомого електричного опору шару пилу (ПЕО) електродах електрофільтру – один з важливих чинників, що впливають ефективність його роботи [9].

Існує критичне значення ПЕО пилу, при якому міра очищення газів в електрофільтрі різко знижується із-за порушення режиму його роботи.

Величина ПЕО пилу залежить від товщини шару, дисперсного складу пилу, вологості, температури і хімічного складу середовища і інших чинників. Тому показних значень можна набути при вимірі ПЕО шаруючи безпосередньо на осаджуваному електроді електрофільтру або шару, сформованого при існуючих параметрах пилогазового потоку безпосередньо в газозоді.

Висновки до розділу 1

Вимірювання концентрації пилу є складним метрологічним завданням. Це обумовлене тим, що пил являє собою складну систему, яку, на противагу газоподібному середовищу, не можна описати в достатньому ступені одним або двома параметрами.

Насамперед, пил майже завжди є полідисперсною системою, тобто характеризується широким спектром розмірів часток (від 10^{-2} до 10^2 мкм). Інтервал концентрацій являється ще більш широким (від 10^{-8} до 10^5 мг/м³) [10]. Крім того, форма й фізико-хімічні властивості часток пилу можуть бути найрізноманітнішими. Слід враховувати й часову зміну властивостей пилу.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ТВЕРДИХ ЧАСТОК В ПРОМИСЛОВИХ ВИКИДАХ

Методи вимірювання концентрації пилу за своїм принципом діляться на дві групи [4-9]:

1. методи з виділенням дисперсної, фази з повітря;
2. методи без попереднього виділення дисперсної фази.

Основною перевагою методів першої групи є можливість вимірювання масової концентрації пилу. До недоліків слід віднести циклічний характер вимірювання, велику трудомісткість, низьку чутливість, що зумовлюють тривалість пробовідбору при вимірюванні малих концентрацій.

Перевагами методів другої групи є можливість безпосередніх вимірювань в самому пилогазового потоці без використання пробовідбірної пристрої, безперервність вимірювань, висока чутливість, практична безінерційна, можливість повної автоматизації процесу вимірювань. Під час вимірювань в потік не вносяться аеродинамічні спотворення.

Істотним недоліком методів другої групи є вплив на результат вимірювання змін дисперсного складу та інших властивостей пилу.

2.1 Методи вимірювання концентрації твердих часток, засновані на попередньому їх осадженні

2.1.1 Ваговий метод

Ваговий метод вимірювання концентрації пилу полягає у виділенні з пилогазового потоку часток пилу та визначенні їх маси шляхом зважування. Концентрацію пилу розраховують за формулою:

$$C = m/(v_B t), \quad (2.1)$$

де m – маса пилу на фільтрі; v_B – об'ємна швидкість просасування повітря через фільтр; t – час відбору проби.

Вимірювання концентрації пилу ваговим методом включає наступні операції: відбір проби запиленого повітря і вимір її обсягу, повне уловлювання, що міститься в пробі пилу і зважування осілого пилу.

Швидкість відбору проби пилу в газоході вибирають, виходячи з умови ізокінетичності. При вимірі концентрації пилу в атмосферному повітрі та повітрі виробничих приміщень з гігієнічної точки зору оптимальною є швидкість відбору, що дорівнює швидкості людського дихання, тобто швидкість легеневої вентиляції (10 – 15 л/хв.). Швидкість повітря зазвичай вимірюють за допомогою ротаметрів. Однак вони мають дуже високу похибку виміру: випадкову 15 – 30% і систематичну 20 – 30% [10]. Більш високу точність дають капілярні витратоміри.

З урахуванням похибок всіх операцій, при здійсненні вимірів концентрації ваговим методом, середня похибка цього методу становить $\pm 30\%$. При відборі проб пилу, маса яких становить менше 1 мг, похибка зростає до $\pm 60\%$.

В даний час ваговий метод широко використовується для вимірювання запиленості як атмосферного повітря та повітря виробничих приміщень, так і промислових викидів. Метод визнаний стандартним в Україні, Англії, Франції, Бельгії, Нідерландах та інших країнах.

Суттєвими перевагами методу є можливість визначення масової концентрації пилу і відсутність впливу її хімічного і дисперсійного складу на результат вимірювання. Проте з усіх існуючих методів він найбільш трудомісткий, при чому найскладнішою операцією є відбір проби пилу. Крім того, метод є циклічним навіть при повній автоматизації всіх операцій.

2.1.2 Радіоізотопний метод

Радіоізотопний метод вимірювання концентрації пилу заснований на використанні властивостей радіоактивного випромінювання, яке поглинається частинками пилу. Безпосередньо виміряти поглинання радіоактивного випромінювання пилом, зваженого в повітрі або який рухається в пилогазовому потоці, практично неможливо через малу концентрацію пилу, тому запилене повітря попередньо фільтрують і потім визначають масу осілого пилу по ослабленню радіоактивного

випромінювання при проходженні його через пиловий осад. Концентрацію пилу розраховують за формулою (2.1).

Масу m , що осіла на фільтрі пилу визначають, виходячи із залежності:

$$I_{\text{рад}} = I_{0,\text{рад}} \exp(-\mu_m m), \quad (2.2)$$

де $I_{\text{рад}}$ і $I_{0,\text{рад}}$ – інтенсивність радіоактивного випромінювання після проходження його через пиловий осад на фільтрі і через чистий фільтр;

μ_m – масовий коефіцієнт поглинання радіоактивного випромінювання, рівний $\mu_m = aE_{\text{max}}^{-b}$ [9];

E – максимальна енергія радіоактивного випромінювання;

a і b – константи ($a = 0,017 \div 0,022$; $b = 1,14 \div 1,50$).

Неоднозначність значень констант a і b зв'язана з енергетичним розподілом часток випромінювання. Масовий коефіцієнт поглинання μ_m залежить також від виду й енергії випромінювання та умов вимірювання (товщини вікна джерела випромінювання і детектора, відстані від джерела до детектора).

При визначенні концентрації пилу радіоізотопним методом найбільш широко використовують β – випромінювання, так як воно володіє достатньою проникаючою здатністю і досить добре підпорядковується експоненціальному закону (2.2).

Проте дослідження, проведені на промисловій установці з використанням радіоактивних джерел ^{14}C і ^{147}Pm , показали, що залежність між інтенсивністю випромінювання, що пройшло через фільтр з осадом пилу і масою пилу m не є строго експоненційною і відрізняється для фільтрів різної товщини. Тому застосування рівняння (2.2) може призвести до вимірювання $\pm 10\%$. При певних розмірах детектора відхилення експериментальних даних від розрахованих по (2.2) може бути зведено до мінімуму.

При виборі радіоактивного ізотопу виходять із умови $\mu_m h_{\text{max}}$ ($\mu_m h_{\text{max}}$ – максимальна товщина осаду пилу). Однак виконання цієї умови утруднено, з одного боку, обмеженим вибором радіоактивних ізотопів, а з іншого –

широким інтервалом вимірюваних товщин осаду. Тому при створенні пиломірів доводиться обмежуватися деяким наближенням до цієї оптимальної умови.

При розрахунку маси осаду пилу на фільтрі необхідно враховувати товщину фільтру і неоднорідність його структури, внаслідок чого поглинання β – випромінювання вздовж фільтра відбувається нерівномірно. З урахуванням цих факторів рівняння (2.2) прийме вигляд:

$$I_{\text{рад}} = I_{0,\text{рад}} \exp(-\mu_m t - \mu_\phi m_\phi), \quad (2.3)$$

де μ_ϕ – масовий коефіцієнт поглинання для фільтру; m_ϕ – маса одиниці площі фільтру.

Виразивши в (2.3) масові коефіцієнти поглинання через шар половинного поглинання β – випромінювання, отримаємо наступну формулу для визначення маси пилу:

$$m = \frac{m_{1/2}}{0,693} \left[\ln \frac{I_{0,\text{рад}}}{I_{\text{рад}}} - \frac{0,693}{m_{1/2\phi}} m_\phi \right] \quad (2.4)$$

Звідси похибка вимірювання Δm складе:

$$\begin{aligned} \Delta m = & \frac{m_{1/2}}{0,693} \left[\ln \frac{I_{0,\text{рад}}}{I_{\text{рад}}} - \frac{0,693}{m_{1/2\phi}} m_\phi \right] \Delta m_{1/2} + \\ & + \frac{m_{1/2} \Delta I_{\text{рад}}}{0,693 I_{\text{рад}}} + \frac{m_{1/2} m_\phi}{m_{1/2\phi}^2} + \frac{m_{1/2}}{m_{1/2\phi}} \Delta m_\phi \end{aligned} \quad (2.5)$$

Припустимо, що $m_{1/2\phi} \approx m_{1/2} \approx m_{1/2Al}$ ($m_{1/2Al}$ – шар половинного ослаблення для алюмінію), $m_\phi = 1,5 \pm 0,1$ мг/см² (фільтр НЕЛ – 3), $\Delta m_{1/2} = \Delta m_{1/2\phi} = \Delta m_{1/2Al} = 0,01$ ($\Delta m_{1/2Al}$ – відносна погрішність вимірювання $m_{1/2Al}$). Якщо вимірювати ту саму ділянку фільтру двічі, без пилу й з пилом, то $\Delta m_\phi \rightarrow 0$, і цією погрішністю можна знехтувати. Перший доданок у рівнянні (2.5) мало в порівнянні з іншими (менше 0,006), ним також можна знехтувати. У результаті отримаємо:

$$\Delta m = \frac{m_{1/2} \Delta I_{\text{рад}}}{0,693 I_{\text{рад}}} + 0,12 \quad (2.6)$$

Тоді граничне значення товщини осаду пилу, надійно обумовленого радіоізотопним методом, буде дорівнювати

$$h_{min} = 3\Delta m = 3 \left[\frac{m_1 \Delta I_{рад}}{2} + 0.12 \right] \quad (2.7)$$

Джерело радіоактивного випромінювання слід вибирати таким чином, щоб він забезпечував необхідне значення h_{min} . Найбільш низькі значення h_{min} можна одержати при використанні ^{99}Tc і ^{147}Pm ($h_{min} = 0,6 \text{ мг/см}^2$, а при виключенні впливу неоднорідності фільтра $h_{min} = 0,3 \text{ мг/см}^2$). Застосування ізоотопу ^{14}C недоцільно, оскільки шар $m_{1/2}$ для ^{14}C порівняємо з товщиною віконця лічильника й фільтра й це приводить до істотної втрати інтенсивності випромінювання (до 70 – 80%) у лічильнику й фільтрі.

Дослідження показали, що поглинання випромінювання ^{147}Pm суворіше підкоряється рівнянню (2.2) у порівнянні з ^{14}C , а зміни товщини осаду пилу меншою мірою впливають на точність виміру, чим при користуванні ^{14}C . Погрішність визначення товщини осаду при відношенні $I_{рад}/I_{0,рад} = 0,6$ для ^{147}Pm складає 4,6%, а для ^{14}C – 10%.

При вимірюванні малих концентрацій пилу має місце неповне покриття фільтра. У цьому випадку (за умови, що сумарна площа проекції часток пилу на площину, перпендикулярну напрямку поширення β – випромінювання, менше площі фільтра) залежність поглинання радіоактивного випромінювання від поверхневої концентрації пилу визначається наступним рівнянням:

$$\frac{I_{рад}}{I_{0,рад}} = 1 - \frac{C_{пов}}{K_{\phi} \rho_{\text{ч}} \bar{d}} [1 - \exp(-K_{\phi} \mu_m \bar{d})], \quad (2.8)$$

де $C_{пов}$ – поверхнева концентрація пилу; K_{ϕ} – коефіцієнт форми часток;

\bar{d} – середній зважений діаметр часток полідисперсного пилу.

З рівняння (2.8) випливає, що поверхнева концентрація пилу не залежить від властивостей пилу (розміру, форми й щільності часток), якщо сумарний показник $K_{\phi} \rho_{\text{ч}} \bar{d}$ залишається постійним.

Чутливість радіоізотопного методу залежить також від кута нахилу площини детектора випромінювання щодо площини, перпендикулярної до

осьового напрямку повітряного потоку. Це явище пояснюється анізотропією детектора.

Сумарна погрішність визначення концентрації пилу радіоізотопним методом рівна

$$\gamma_{\text{рад}} = \sqrt{\gamma_m^2 + \gamma_S^2 + \gamma_V^2}, \quad (2.9)$$

де γ_m , γ_S , γ_V — погрішності визначень маси пилу m , площі фільтра S і об'єму повітря V , що пройшов через фільтр.

При порівняльних визначеннях концентрацій атмосферного пилу радіоізотопним і вагарням методами встановлено, що погрішність вимірів радіоізотопним методом не перевищує 30%. Оскільки методика вимірювання концентрації пилу за допомогою радіоізотопного методу простіше й не поступається ваговому методу по точності й чутливості, то він цілком може замінити ваговий метод при створенні автоматичних систем вимірювання.

Слід зазначити деяку перевагу радіоізотопного методу вимірювання концентрації пилу в атмосферному повітрі в порівнянні з ваговим. Тому що радіоізотопним методом визначають масу пилу, віднесену до одиниці поверхні фільтра, тоді зменшення площі останнього не знижує точності виміру, тоді як у ваговому методі точність вимірів знижується зі зменшенням площі фільтра. У радіоізотопному методі площа фільтра визначається розмірами джерела випромінювання й не перевищує 1 см^2 . При цьому витрата повітря менша, чим при вимірюванні по ваговому методі; можна застосовувати повітродувку невеликої потужності. Остання обставина досить істотна при створенні малогабаритної переносної апаратури. Виграш по потужності складе

$$K_p = S_B \eta_{\text{рад}} / (S_{\text{рад}} \eta_B), \quad (2.10)$$

де K_p — коефіцієнт, що враховує виграш по потужності;

S_B , $S_{\text{рад}}$ — площі фільтрів, використовуваних у ваговому і радіоізотопному методах;

η_B , $\eta_{\text{рад}}$ – к.к.д. повітродувок, використовуваних у ваговому й радіоізотопному методах.

Звичайно $Kp = 5 \div 10$ (з урахуванням того, що к.к.д. повітродувки при малих витратах зменшується).

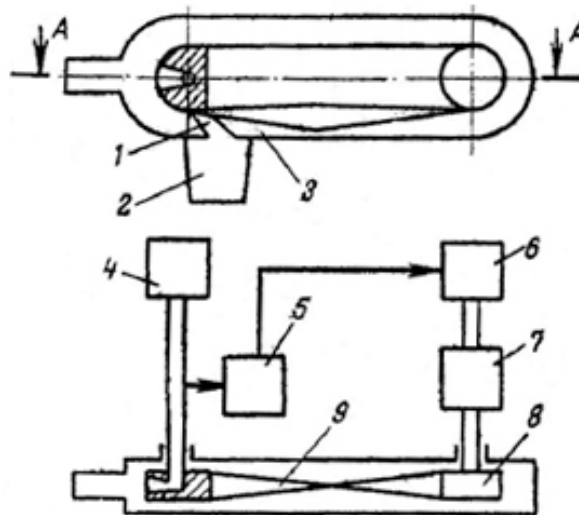


Рис. 2.1 – Схема пристрою для визначення концентрації пилу радіоізотопним методом з фільтром у вигляді петлі з переверненою гілкою: 1 – ніж; 2 – пилозбірний бункер; 3 – корпус; повітродувка; 5 – датчик; 6 – стрічкопротягувальний механізм; 7 – лічильник; 4 – шків; 9 – фільтрувальна стрічка.

Становить інтерес впровадження регенерації стрічкового фільтра з метою багаторазового його використання. Це дозволить створити повністю автоматизовані радіоізотопні пиломіри, а також і інші прилади, засновані на методах з попереднім осадженням пилу.

2.2. Оптичні методи

Цей метод вимірювання заснований на попередньому осадженні часток пилу на фільтрі й визначенні оптичної щільності пилового осаду. Метод включає операції аналогічні ваговому але замість зважування пилового осаду проводять його фотометрирування. Оптичну щільність пилового осаду можна визначати шляхом виміру поглинання або розсіювання ним світла.

2.2.1. Фотометричний метод

Цей метод вимірювання заснований на попередньому осадженні часток пилу на фільтрі й визначенні оптичної щільності пилового осаду. Метод включає операції аналогічні ваговому але замість зважування пилового осаду проводять його фотометрирування. Оптичну щільність пилового осаду можна визначати шляхом виміру поглинання або розсіювання ним світла.

Вимірювання оптичної щільності пилового шару по поглинанню світла засноване на визначенні інтенсивності світла I , що пройшло через шар:

$$I = I_0 \exp(-\varepsilon Cl), \quad (2.11)$$

де I_0 – інтенсивність початкового світлового потоку;

C – концентрація пилу, що накопичується на фільтрі;

ε – показник поглинання світла, що приходить на одиницю концентрації пилу;

l – товщина шару пилу.

Оптична щільність D пилового шару дорівнює:

$$D = \lg\left(\frac{I_0}{I}\right) = 0,43\varepsilon Cl \quad (2.12)$$

Оскільки при осадженні пилу на фільтр змінюються як концентрація її C , так і товщина шару l , то при вимірі оптичної щільності пилового шару можна визначити тільки сумарну величину Cl , що є поверхневою концентрацією $C_{\text{пов}}$ пилу на фільтрі:

$$C_{\text{пов}} = Cl$$

Звідси:

$$D = 0,434\varepsilon C_{\text{пов}}, \quad (2.13)$$

тобто між оптичною щільністю пилового шару, що утворився, і поверхневою концентрацією пилу існує лінійна залежність. Вимірявши D і знаючи показник поглинання ε , можна визначити $C_{\text{пов}}$:

$$C_{\text{пов}} = D/(0,434\varepsilon) \quad (2.14)$$

Концентрація пилу може бути також визначена через коефіцієнт пропускання $\tau = I/I_0$, який пов'язаний з оптичною щільністю наступним виразом: $D = \lg\left(\frac{1}{\tau}\right)$. Підставивши значення D у рівняння (2.14), одержимо:

$$C_{\text{пов}} = \lg\left(\frac{1}{\tau}\right) / (0.434\varepsilon) \quad (2.15)$$

Поверхневу концентрацію пилового шару можна визначити й шляхом вимірювання інтенсивності розсіяного ним світла. Розглянемо залежність між поверхневою концентрацією пилу, що осів на фільтрі, і інтенсивністю розсіяного ним світла. Припустимо, що частки пилу діаметром d мають сферичну форму й площа проекції частки на площину фільтра дорівнює $a = \pi d^2/4$. Введемо коефіцієнт незаповненості W поверхні фільтра при наявності на ньому N часток пилу [11]:

$$W = S_{\Phi} - \frac{S_N}{S_{\Phi}} = \left(1 - \frac{a}{S_{\Phi}}\right)^N, \quad (2.16)$$

де S_N – площа фільтра, заповненого N частками.

Так як $S_{\Phi} \gg a$ і для круглого фільтра діаметром D_{Φ} $S_{\Phi} = \pi D_{\Phi}^2/4$, то

$$W = \left(1 - \frac{a}{S_{\Phi}}\right)^N \simeq \exp\left(-\frac{aN}{S_{\Phi}}\right) = \exp\left[-(d/D_{\Phi})^2 N\right] \quad (2.17)$$

Якщо число часток, що осіли на фільтрі при відборі проби, виразити через масову концентрацію пилу в контрольованому пилогазовому потоці:

$$N = 6VC/(\pi\rho_{\text{ч}}d^3),$$

де V – об'єм пилогазового потоку, що пройшов через фільтр при відборі проби, то для коефіцієнта незаповненості фільтра можна записати наступний вираз:

$$W = \exp\left[-6VC/(\pi d D_{\Phi}^2 \rho_{\text{ч}})\right] \quad (2.18)$$

Звідси масова концентрація пилу складе:

$$C = \frac{\pi d D_{\Phi}^2 \rho_{\text{ч}} \ln(1/W)}{6V} \quad (2.19)$$

Поверхнева концентрація виразиться рівнянням:

$$C_{\text{пов}} = \frac{CV}{S_{\Phi}} = 2/3 \rho_{\text{ч}} d \ln(1/W) \quad (2.20)$$

Інтенсивність світла, розсіяного поверхнею фільтра з обложеною на ній пилом, дорівнює:

$$I_{\text{рас}} = I_{\text{рас,ф}}W + I_{\text{рас,п}}(1 - W), \quad (2.21)$$

де $I_{\text{рас,ф}}$ і $I_{\text{рас,п}}$ – інтенсивність світла, розсіяного чистим фільтром і пиловим осадам відповідно.

Враховуючи (2.20) і (2.21), одержимо:

$$C_{\text{пов}} = 2/3\rho_{\text{ч}}d\ln \frac{I_{\text{рас,ф}} - I_{\text{рас,п}}}{I_{\text{рас}} - I_{\text{рас,п}}} \quad (2.22)$$

Дослідження вугільного пилу фотометричним методом показали, що точність вимірювання концентрації для часток розміром менше 7 мкм рівна $\pm 10\%$, для часток із широким інтервалом зміни їх розмірів вона становить $\pm 30\%$.

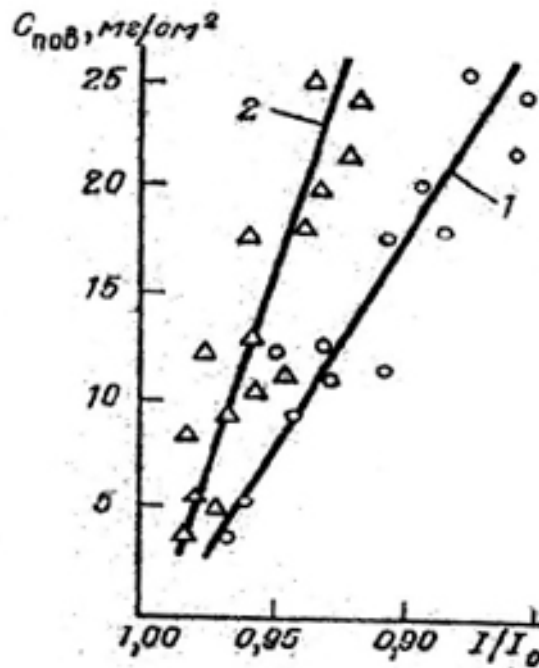


Рис. 2.2 – Залежність між поверхневою концентрацією пилу на фільтрі й інтенсивністю світла, що пройшло через фільтр (1) і розсіяного частками пилу (2).

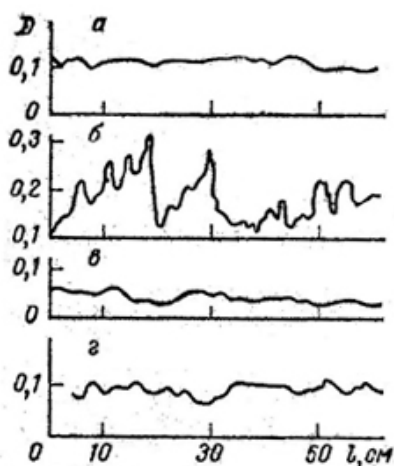


Рис. 2.3 – Вимірювання оптичної щільності по довжині стрічкових фільтрів: а – НЕЛ; б – целюлозно-паперового; в – ЛФС; г – мембранного

Порівняльні дослідження оптичних властивостей фільтрів показали [12], що фільтри краще відбивають, чим пропускають, білизна фільтра уздовж його довжини змінюється значно менше, чим його оптична щільність (усього на 0,9%). Найбільшою рівномірністю білизни мають мембранні ультрафільтри й фільтрувальний папір. Коливання білизни для цих фільтрів відповідає поверхневій концентрації пилу, рівною $0,15 \cdot 10^{-3}$ мг/см². Відмічені властивості фільтрів вказують на перевагу вимірювання, концентрації пилу по інтенсивності розсіяного світла.

Основний недолік фотометричного методу пов'язаний з тим, що прозорість пилового осаду суттєво залежить від кольору часток і їх оптичної щільності. Згідно даним роботи [13], погрішність, обумовлена змінами кольору й оптичної щільності часток, може бути значно зменшена, якщо використовувати світло з довжиною хвилі 0,36 – 0,39 мкм.

2.2.2 Люмінесцентний метод

Для визначення концентрації пилу в атмосферному повітрі використовують осадження її на фільтр, оброблений певними флуоресціюючими розчинами, і наступне вимірювання інтенсивності випромінювання флуоресценції.

Для виключення впливу зміни флуоресцентних властивостей фільтра вимірюють інтенсивність флуоресценції фільтра до й після осадження на ньому пилового осаду.

Отримана лінійна залежність між поверхневою концентрацією пилу $C_{\text{пов}}$ і співвідношенням інтенсивностей випромінювання флуоресценції чистого фільтра й фільтра з пиловим осадом (рис. 2.4) [14]. Осілий пил спричиняє гасіння флуоресценції причому має місце лінійна залежність між гасінням флуоресценції й поверхневою концентрацією пилу, який апроксимується наступним рівнянням:

$$\frac{I_{0,\text{фл}}}{I_{\text{фл}}} = 0,948 + 0,059 C_{\text{пов}} \quad (2.23)$$

2.3. П'єзоелектричний метод

Одним з перспективних методів вимірювання концентрації пилу є п'єзоелектричний метод. Можливі два варіанти використання цього методу: вимірювання змін частоти коливань п'єзокристала при осадженні на його поверхні часток пилу й рахунок електричних імпульсів, що виникають при зіткненні часток пилу з п'єзокристалом.

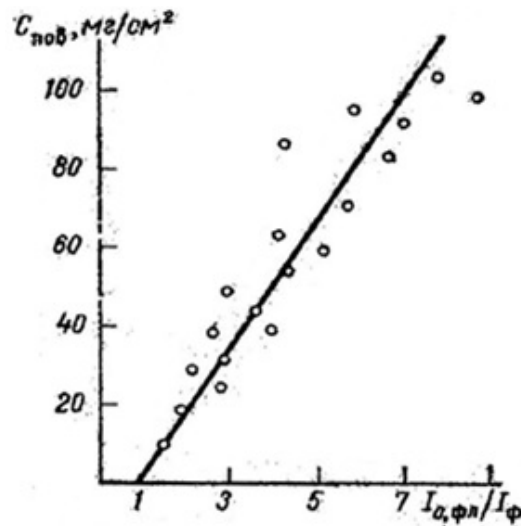


Рис. 2.4 – Залежність між поверхневою концентрацією пилу й відношення інтенсивностей випромінювання флуоресценції чистого фільтра $I_{0,\text{фл}}$, фл і фільтра з пиловим осадом $I_{\text{фл}}$.

У першому варіанті п'єзоелектричний кристал 2, звичайно у вигляді диска, розміщується усередині корпусу 3 приладу назустріч повітряному потоку (рис. 2.5). У вихідному отворі приладу розташований вентилятор 5. П'єзокристал включений у контур резонатора 8, налаштованого на певну частоту f . За вимірювальним кристалом установлений компенсаційний п'єзокристал 4, ізольований від пилегазового потоку. Цей кристал включений у контур резонатора 6, частота якого f_k відмінна від f . Вихідні коливання обох резонаторів подають на блок порівняння 7, вихідний сигнал якого пропорційний різниці $\Delta f = f - f_k$. При осадженні часток пилу на вимірювальний кристал частота коливань останнього зменшиться на Δf_1 при цьому зміниться різниця

$$\Delta f_2 = f - f_k - \Delta f_1 = \Delta f - \Delta f_1$$

Установлено, що при малих амплітудах коливань:

$$\Delta f_1 = A m \quad (2.24)$$

де A – коефіцієнт пропорційності.

Тобто зміна частоти вимірювального кристала прямо пропорційно масі m осілої на ньому пилу.

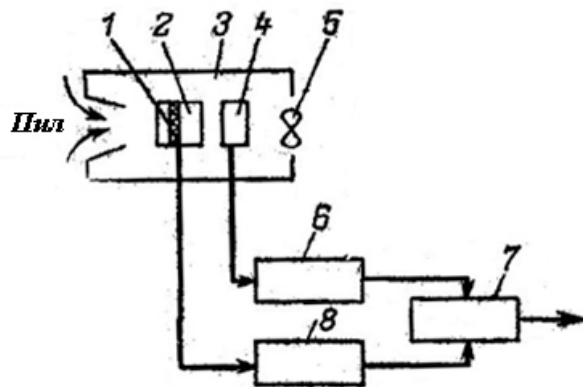


Рис.2.5 – Схема п'єзоелектричного пиломіра: 1 – липке покриття; 2 – вимірювальний п'єзокристал; 3 – корпус; 4 – кристал, що компенсує; 5 – вентилятор; 6, 8 – резонатори; 7 – блок порівняння.

Ефективність п'єзоелектричного методу можна підвищити, якщо забезпечити збільшення сили захоплення часток кристалом і періодичне

очищення його поверхні. Для збільшення сили захоплення застосовують липкі покриття, які наносять на робочу поверхню кристала. Можна також здійснювати примусове осадження часток під дією зовнішньої сили, наприклад електроосадження. Змінюючи швидкість прокачування пилогазового потоку, через кристал, можна проводити сепарацію часток.

Суттєвою перевагою п'єзоелектричного методу є те, що він дозволяє вимірювати масову концентрацію пилу.

2.4. Метод механічних вібрацій

В основу методу механічних вібрацій покладений вимір змін частоти коливного елемента при осадженні на ньому пилу. Можна використовувати коливальний фільтр [15], укріплений у пружинному тримачу. Спеціальний пристрій збуджує коливання фільтра в горизонтальній площині. За допомогою насоса пилогазовий потік пропускають через фільтр і вимірюють частоту коливань останнього до й після прокачування потоку. Порівняльний пристрій видає сигнал, пропорційний масі осілого пилу. Для виключення погрішності через наявність вологи в контрольованому потоці, прилад постачають нагрівачем.

Показано [16,17], що більш ефективно використати вібратор у вигляді коливної стрічки із введенням електростатичного осадження на ній часток пилу. Кутова частота коливань механічного вібратора дорівнює:

$$\omega = \sqrt{a/m_B}, \quad (2.25)$$

де m_B – маса вібратора; a – коефіцієнт пружності.

Зі збільшенням маси вібратора на Δm_B за рахунок осадження на ньому пилу частота зміниться на величину:

$$\Delta\omega = \Delta m_B / (2m_B) \quad (2.26)$$

При виборі частоти й амплітуди коливань вібратора виходять із того, щоб забезпечити лінійну залежність між Δm_B і $\Delta\omega$, необхідну чутливість методу й ефективно вловлювання пилу.

Розглянемо силу, з якої частка пилу масою m_q діє на вібратор:

$$\frac{F}{X} = \frac{b\omega + m_{\text{ч}}\omega^2}{1 + \frac{b\omega}{\alpha} + m_{\text{ч}}\omega^2/\alpha}, \quad (2.27)$$

де $\frac{F}{X}$ – пружна протидія, яка випробовує вібратор з боку частки пилу; F – реактивна сила впливу частки; X – зсув коливної частки; b – коефіцієнт загасання.

З рівняння (2.27) випливає, що при низьких частотах коливання вібратора дія осілої на ньому частки пилу аналогічно збільшенню маси вібратора на величину, рівну масі частки пилу $m_{\text{ч}}$. При цьому власна частота коливань вібратора зменшується. При більш високих частотах коливань осіла частка пилу сприяє загасанню коливань вібратора, однак при цьому частота змінюється незначно. При високих частотах коливання вібратора, частка пилу діє як зв'язана пружина, при цьому частота коливань вібратора збільшується.

Звідси випливає, що для реалізації методу механічних вібрацій доцільно використовувати низькі частоти.

При виборі амплітуди коливань вібратора накладаються обмеження, обумовлені силами зчеплення, які втримують частку пилу на вібраторі. При синусоїдальному збудженні вібратора сила інерції частки дорівнює

$$m_{\text{ч}}X = -m_{\text{ч}}\omega^2 X_0 \sin \omega t, \quad (2.28)$$

де X_0 – амплітуда коливань.

Зі збільшенням кругової частоти й для втримання частки необхідно зменшувати амплітуду коливань. Тому звичайно використовують досить низькі частоти коливань і додатково здійснюють електростатичне осадження пилу.

На підставі методу механічних вібрацій розроблений макет приладу (рис. 2.6) з вібратором у вигляді стрічки [18].

Стрічка безупинно перемотується з бобіни 7 на бобіну 1 зі швидкістю 0,2 см/хв. Дві пари підшипників обмежують вимірювальний 2 і порівняльний 5 ділянки стрічки, які приводяться в коливальний рух за допомогою випромінювачів 3, 6.

Частота коливань стрічки дорівнює 350 Гц. У пробовідбірному пристрої 4 через стрічку за допомогою насоса просмоктується запилене повітря (витрата повітря 2 л/хв). За рахунок високої напруги досягається електростатичне осадження пилу. Передбачене регулювання натягу стрічки при осадженні на ній пилу. Вихідні сигнали, пропорційні частоті коливань чистої стрічки й стрічки з осілим пилом, відповідно, подають на порівняльний пристрій та індикаторний блок 9.

Частота коливань стрічки визначається рівнянням:

$$f_L = \sqrt{\frac{F_L}{m}} / (2l_L) \quad (2.29)$$

визначається силою натягу стрічки F_L , довжиною стрічки l_L між точками зміцнення її й масою m осілого пилу. Чутливість методу становить:

$$\frac{df_L}{dm} = \frac{F_L}{4l_L^2(m + \frac{m_B}{l_L})\sqrt{m + \frac{m_B}{l_L}}} \text{ для } \frac{m_B}{l_L} \ll m \quad (2.30)$$

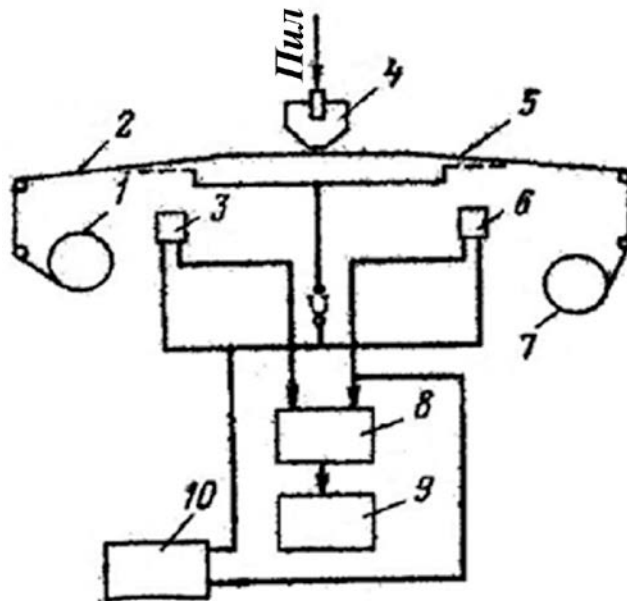


Рис. 2.6 – Схема пілометра з вібруючою стрічкою: 1,7 – бобіни; 2,5 – вимірювальний і порівняльний ділянки стрічки; 3,6 – випромінювачі звуку; 4 – пробовідбірний пристрій; 8 – блок порівняння; 9 – індикаторний блок; 10 – генератор.

Попередні випробування макета показали, що на результат вимірювання впливають нерівномірності товщини стрічки, можливі

коливання температури й тиску при пересуванні стрічки із зони порівняння у вимірювальну зону, нерівномірність товщини пилового осаду, тертя в підшипниках при русі стрічки, мінливість натягу її й ряд інших факторів.

2.5. Метод, заснований на вимірюванні перепаду тисків на фільтрі

Концентрацію пилу можна визначити, пропускаючи пилогазовий потік з постійною швидкістю через фільтр і вимірюючи різницю тисків на вході й виході фільтра. Об'єм газу, що пройшов через фільтр за час t , рівний:

$$V = Zt + V_H \ln (\Delta p / \Delta p_0), \quad (2.31)$$

де Z – продуктивність насоса;

V_H – об'єм повітря між фільтром і насосом;

Δp_0 – перепад тисків на фільтрі при $t = 0$;

Δp – перепад тисків у момент t .

Отримана залежність $\Delta p(t)$ [19] яка апроксимується наступною лінійною функцією:

$$\Delta p = \Delta p_0 - at, \quad (2.32)$$

де a – коефіцієнт пропорційності.

Підставивши значення Δp у рівняння (2.31), одержимо

$$V = Zt + V_H \ln (-at / \Delta p_0) \quad (2.33)$$

Другий член являється нескінченно малим у порівнянні з першим $at / \Delta p_0 \ll 1$, тому рівняння (1.2.33) можна спростити:

$$V = Zt \quad (2.34)$$

Враховуючи рівняння (1.2.32), одержимо наступне вираження для маси осілої на фільтрі пилу:

$$m = CV = CZ(\Delta p_0 - \Delta p) / a \quad (2.35)$$

Даний метод можна використовувати для безперервного вимірювання масової концентрації пилу в потоці.

2.6. Методи вимірювання концентрації твердих часток без попереднього їх осадження

Метод заснований на явищі поглинання світла при проходженні його через пилегазове середовище.

2.6.1. Абсорбційний метод

Згідно із законом Бугера – Ламберта – Бера оптична щільність D шару пилегазового середовища заданої товщини l прямо пропорційна коефіцієнту поглинання ε і концентрації пилу C у цьому середовищі. Дане твердження слушне, якщо припустити, що пил складається з абсолютно чорних сферичних часток однакового діаметра, і коефіцієнт поглинання не залежить від концентрації. Остання умова означає, що кожна частка поглинає світло незалежно від інших часток. Однак при більших концентраціях спостерігається залежність коефіцієнта поглинання від концентрації пилу, тому що в цьому випадку частки починають взаємодіяти один з одною. Це провадить до відхилення від закону Бугера – Ламберта – Бера й порушенню прямолінійної залежності [див. (2.12)], яке зводиться до зменшення ступеня зміни оптичної щільності залежно від концентрації. Крім того, реальні пилегазові середовища містять частки різної форми й розмірів і їх не можна розглядати як абсолютно чорні тіла.

Ослаблення світла полідисперсного пилогазового середовища обумовлене не тільки поглинанням, але й розсіюванням світла і є складною функцією розмірів часток.

На рисунку 2.7 наведена залежність коефіцієнта ослаблення від параметра $\rho = 2\pi r/\lambda$ розміру, що являється функцією розміру часток r (λ – довжина світлової хвилі). Як видно, коефіцієнт ослаблення коливається близько середнього значення $\mu = 2$, асимптотично наближаючись до нього.

При дослідженні пилогазового середовища фотоприймач реєструє не тільки світловий потік, ослаблений цим середовищем, але й світло, розсіяне частками пилу в межах апертури кута $2\varphi = D_d/f_{об}$ (D_d – діаметр діафрагми

перед фотоприймачем, $f_{об}$ – фокусна відстань об'єктива, який фокусує світло на світлочутливій поверхні фотоприймача).

Чутливість оптичного абсорбційного методу, як впливає із рівняння (2.35), дорівнює

$$\frac{\Delta I}{\Delta C} = -\varepsilon l I_0 \exp(\varepsilon l C) = -\varepsilon l I \quad (2.36)$$

Таким чином, чутливість методу тим вище, чим більший коефіцієнт поглинання ε , товщина поглинаючого шару l і інтенсивність випромінювання I пройденого через пилегазове середовище. При вимірюванні малих концентрацій пилу для підвищення чутливості використовують дзеркальні системи, щоб світловий потік двічі проходив через вимірюване пилегазове середовище. При цьому вимірювальна база приладу (рівна товщині поглинаючого шару) збільшується вдвічі.

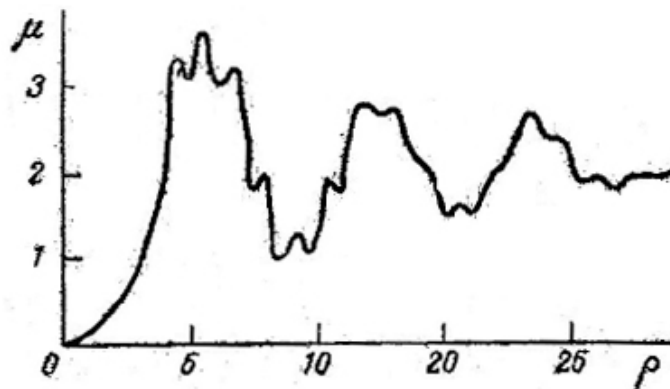


Рис. 2.7 – в Залежність коефіцієнта ослаблення μ частки відпараметра ρ .

Впливає, однак, мати на увазі, що чутливість максимальна тільки в тому випадку, якщо при даних ε і l інтенсивність світлового потоку, що проходить через досліджуване пилегазове середовище, буде досить великою. А якщо ні, то може вийти, що при більших значеннях товщини поглинаючого шару й концентрації пилу інтенсивність минулого випромінювання виявиться настільки мала, що чутливість вимірювання буде близькою до нуля. Тому для кожного виду пилу слід визначати оптимальне значення l , при якому чутливість вимірювання буде максимальною.

Інтенсивність минулого світлового потоку при заданих ε і l можна збільшити, використовуючи потужне джерело світла, наприклад лазер. Так,

згідно [20], при заміні накалювання СЦ – 64 на лазер типу ЛГ – 75 світловий потік збільшується в 3,5 рази. Зазначені переваги особливо відчутні при визначенні концентрацій пилу в газових середовищах, оптична щільність яких менше $0,4/\alpha$ (α – константа, що характеризує тип фотоприймача).

Оптичний метод вимірювання концентрації пилу, що використовує ослаблення світла, має такі переваги, як мала трудомісткість, практична безінерційність вимірювання й можливість виміру безпосередньо в пилогазовому середовищі без пробовідбору при повній автоматизації процесу вимірювання. Метод дозволяє проводити безперервні вимірювання й визначати миттєві значення концентрації пилу без внесення збурювань у досліджуване середовище, що нездійсненне, при використанні методів, заснованих на попередньому осадженні пилу. До недоліків методу слід віднести вплив змін хімічного й дисперсного складу пилу на результати вимірювань, порівняно вузький інтервал змінюваних концентрацій.

2.6.2. Метод інтегрального світлорозсіювання

Даний метод дає можливість визначати масову концентрацію часток пилу по вимірюванні сумарної інтенсивності розсіяного світла. Здатність часток пилу розсіювати світло залежить від ряду факторів, а саме: від параметра ρ , комплексного коефіцієнта переломлення частки $n' = n + i\varepsilon'$ (n – коефіцієнт переломлення) і кута розсіювання θ між напрямками падаючого розсіяного світла. У загальному випадку інтенсивність світла, розсіяного сферичною часткою, може бути розрахована по рівнянню Мі:

$$I_{\text{рас } \theta} = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 R^2} [I_{\perp}(\rho, n', \theta) + I_{\parallel}(\rho, n', \theta)], \quad (2.37)$$

де $I_{\text{рас } \theta}$ – інтенсивність світла, розсіяного під кутом θ до падаючого потоку, розрахована на одиницю інтенсивності падаючого світла; R – відстань від точки спостереження до частки; $I_{\perp}(\rho, n', \theta)$ і $I_{\parallel}(\rho, n', \theta)$ – інтенсивність розсіяного світла, поляризованого перпендикулярно й паралельно площині розсіювання.

Згідно (2.37) світло, розсіяне часткою, складається із двох некогерентних плоскополяризованих компонентів $I_{\perp}(\rho, n', \theta)$ і $I_{\parallel}(\rho, n', \theta)$, площини поляризацій які взаємно перпендикулярні. Це положення підтверджене експериментально. Сумарна інтенсивність розсіяного світла суттєво залежить від параметра ρ . Можна виділити три основні граничні значення цього параметра: $\rho \ll 1$, $\rho \approx 1$, $\rho \gg 1$. У випадку $\rho \ll 1$ розміри часток малі в порівнянні з довжиною хвилі λ і розсіювання світла сферичною часткою радіусом r з діелектрика для неполяризованого світла описується рівнянням Релея:

$$I_{\text{рас}} = \frac{9\pi^2 r^6 (n'^2 - 1)}{2R^2 \lambda^4 (n' + 2)} (1 + \cos^2 \theta) \quad (2.38)$$

так як інтенсивність розсіяного світла пропорційна r^6/λ^4 .

Рівняння Релея може бути отримане із загального рівняння Мі для $\rho \ll 1$. Якщо $\rho \approx 1$, розміри часток рівні з λ . Залежність між інтенсивністю розсіяного світла, розміром часток r і λ визначається рівнянням Мі. При $\rho \gg 1$ розміри часток значно більше довжини хвилі падаючого світла. Ряди в рівнянні Мі сходяться вкрай повільно, при цьому рівняння стає занадто складним. Однак для випадку розсіювання світла великими частками теорія Мі збігається із класичною оптикою, тому що для великих прозорих непоглинаючих сфер розсіювання зводиться до наступних процесів: відбиттю світла без проникнення його в сферичну частку, переломленню із внутрішнім відбиттям або без нього й дифракції.

Дифракційна складова розсіяного світла залежить від форми й розміру частки, але не залежить від її природи й стану поверхні. Напрямок поширення цієї складової збігається з напрямком падаючого світлового потоку.

Для характеристики просторової картини розсіювання випромінювання часткою користуються поняттям індикатриси розсіювання, що задається відношенням інтенсивності світла, розсіяного часткою в даному напрямку θ , до інтенсивності світла, розсіяного в усі сторони:

$$f(\theta) = \frac{I_{\text{рас}}(\theta)}{\int_{4\pi} I_{\text{рас}}(\theta) d\omega}, \quad (2.39)$$

де $d\omega$ – елемент тілесного кута.

Для малих часток, що задовольняють умовам $\rho \ll 1$ і $\rho n' \ll 1$, індикатриса розсіювання описується формулою Релея:

$$f(\theta) = 1 + \cos^2 \theta \quad (2.40)$$

Побудована по цій формулі індикатриса (рис. 2.8а) симетрична. Максимальне розсіювання має місце в напрямках $\theta = 0^\circ$ і $\theta = 180^\circ$, при чому по ходу променя розсіюється така ж кількість світла, як і у зворотному напрямку. Значення параметра ρ , при яких спостерігається релеєвський розподіл розсіяного випромінювання, залежить від електрооптичних властивостей речовини часток, які характеризуються комплексним показником переломлення n' . Для провідних часток (більші значення n') область значень ρ завжди вужче, чим для непровідних часток (малі n'). Так, якщо для діелектричних часток релеєвський розподіл розсіяного випромінювання має місце при $\rho \leq 10^{-2}$, то для провідних часток з n' , близьким до 100, аналогічний розподіл буде спостерігатися лише в часток з $\rho \leq 10^{-4}$.

У міру зростання параметра ρ від 0 до ∞ індикатриса розсіювання безупинно змінює свою форму, стаючи усе більш асиметричною й витягнутою вперед (ефект Мі). Так, для часток з $n = 1,5$ і радіусами 0,5; 1,6; 5,0; 12,5 мкм ($\rho = 6,28; 18,84; 62,8; 157$) значення коефіцієнта асиметрії індикатрисы, рівного відношенню розсіяного вперед та назад потоків світла, становлять 17, 74, 823, 16000.

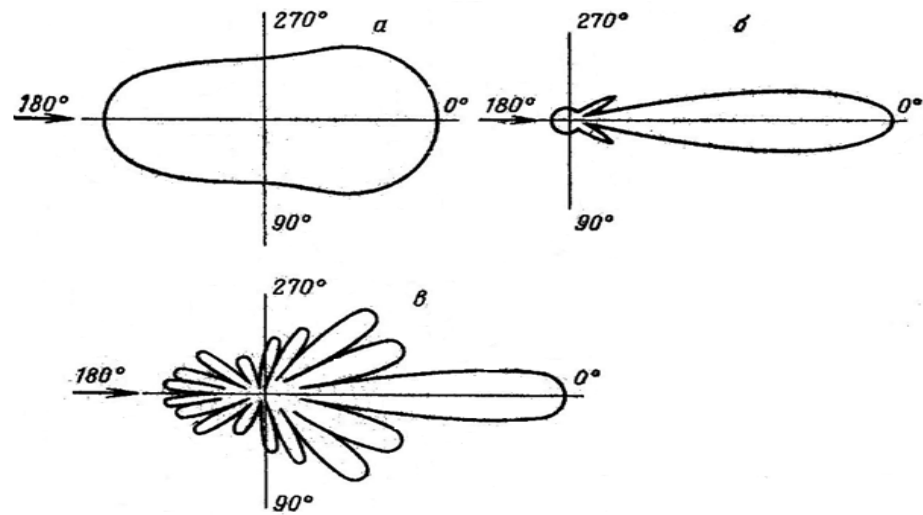


Рис. 2.8 – Індикатрисы розсіювання для часток з різним значенням параметра ρ : а – $\rho \ll 1$; б – $\rho = 2,6$; в – $\rho \approx 8$

На рисунку 2.8б приведена індикатриса розсіювання для частки з $\rho = 2,6$ і $n' - 1,44$ [21], Для якої спостерігається яскраво виражене розсіювання вперед. При $\rho \approx 8$, тобто при розсіюванні світла більшими частками (рисунок 2.8в), утворюється велика кількість побічних максимумів.

Таким чином, інтенсивність розсіяного світла розподіляється навколо частки складним способом, і для реєстрації розсіяного світла необхідно правильно вибирати кут θ .

У більшості випадків частки пилу є порівняно великими опуклими частками, для яких параметр $\rho > 1$, з випадковою орієнтацією в просторі. Отримане спрощене рівняння, що дозволяє визначити інтенсивність світла $I_{\text{рас } \theta}$ розсіяного такою часткою під кутом розсіювання θ [20]

$$I_{\text{рас } \theta} = I_0 \bar{S} f(\theta) / (4\pi R), \quad (2.41)$$

де \bar{S} – середній геометричний поперечний переріз частки довільної форми.

При розсіюванні незалежними частками світлові хвилі, розсіяні різними частками, строго когерентні з світловою хвилею, що опромінює ці частки, але некогерентні між собою. При визначенні сумарної інтенсивності світла, розсіяного системою таких незалежних часток, інтенсивності світла, розсіяного окремими частками, повинні складатися без урахування фази, тобто фазовими ефектами можна зневажити.

Враховуючи умову адитивності й рівняння (2.41), інтенсивність світла, розсіяного під кутом θ об'ємом $V_{\text{рас}}$, що містяться в одиниці об'єму N великих незалежних часток, може бути виражена в такий спосіб:

$$I_{\text{рас } \theta} = I_0 \bar{S} f(\theta) N V_{\text{рас}} / (4\pi R) \quad (2.42)$$

Рівняння (2.42) може бути застосоване тільки для однократного розсіювання, коли інтенсивність початкового світлового потоку однакова для всіх часток.

При багатократному розсіюванні інтенсивність початкового світлового потоку для різних часток неоднакова, тому що первісний потік послабляється в результаті взаємодії із частками. Крім того, кожна частка одночасно піддається опроміненню світлом, розсіяним іншими частками. Тому сумарна інтенсивність при багаторазовому розсіюванні світла вже не буде пропорційна числу часток, що розсіюють, через наявність зазначених вище ефектів, тобто порушується закон адитивності.

Практично для оцінки впливу багатократного розсіювання можна користуватися слідуючим критерієм:

- при $r_{\text{рас}} = \ln(I_0 / I_{\text{рас}}) < 0,1$ впливом багатократного розсіювання можна зневажити;
- при $0,1 < r_{\text{рас}} < 0,3$ необхідно вводити поправки на багатократне розсіювання;
- при $r_{\text{рас}} > 0,3$ багатократне розсіювання відіграє суттєву роль.

Розгляд світлорозсіювальних властивостей часток пилу різних розмірів дозволяє зробити наступний. Для часток радіусом більше 1 мкм інтегральна інтенсивність розсіяного світла $I_{\text{рас}}$ пропорційна рахунковій концентрації часток N і середньому поперечному перерізу частки \bar{S} (для сферичних часток пропорційна r^2). Для ультрадрібних часток радіусом менше 0,1 мкм інтенсивність розсіяного світла пропорційна r^6 , а для часток з радіусом від 0,1 до 1 мкм $I_{\text{рас}}$ пропорційна r^n , де значення показника n змінюється від 6 до 2.

У результаті експериментальних досліджень залежності інтенсивності світлорозсіювання $I_{\text{рас}}$ від концентрації C для полідисперсних часток (рисунок 2.9) встановлено [19], що $C = 450 I_{\text{рас}} / I_0$ (мг/м³). Аналогічна залежність $C = 380 I_{\text{рас}} / I_0$ (мг/м³) приведена в роботі [59].

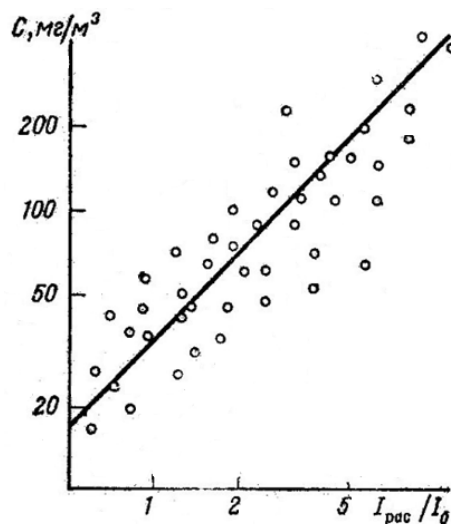


Рис. 2.9 – Залежність між масовою концентрацією пилу й відношенням інтенсивностей розсіяного $I_{\text{рас}}$ і падаючого I_0 світлових потоків.

Метод інтегрального світлорозсіювання дозволяє створити високочутливі пиломіри. Так, чутливість пиломіра Sigrist становить 0,005 мг/м³. Метод особливо ефективний при вимірюванні малих концентрацій.

2.6.3. Голографічний метод

Аналіз аерозольних часток був однією з перших областей застосування голографії (1964 р.) [23].

Голографічний метод заснований на одержанні фраунгоферової голограми, яка являє собою накладення дифракційної картини частки дальнього поля й поля джерела світла. Метод дозволяє одержати інформацію про рахункову концентрацію часток, їх розмірі й положенні в просторі.

На рисунку 2.10 дана схема установки для одержання фраунгоферової голограми. Вимірювальна камера 2 із частками освітлюється імпульсом рубінового лазера 1. За допомогою лінзи 3 досліджуваний потік часток записується на голограмі 4 у збільшеному вигляді.

Для відновлення зображення по голограмах використовується гелій – неоновий лазер з безперервним випромінюванням, який освітлює голограму 1 (рисунок 2.11). Відновлюване зображення 2 поміщається в передній фокус лінзи 3, яка проектує зі збільшенням одну із площин зображення на трубку телевізійної камери 4. Зображення цієї площини спостерігається на телевізійному екрані 5, загальне збільшення досягає 300.

Використання голографічного методу дозволяє одночасно реєструвати амплітуду й фазу світла, розсіяного аерозольними частками. Це дає можливість із великою точністю й розширенням визначати розміри часток.

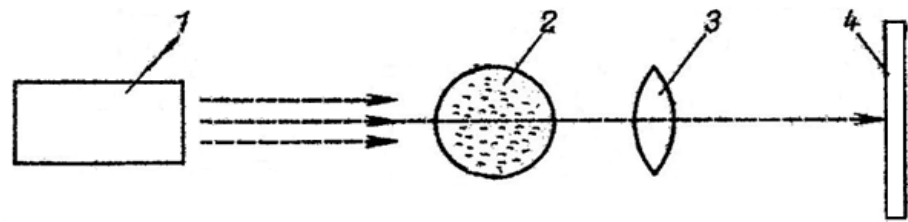


Рис. 2.10 – Установка для реєстрації голограм часток пилу: 1 – лазер; 2 – вимірювальна камера; 3 – лінза; 4 – голограма.

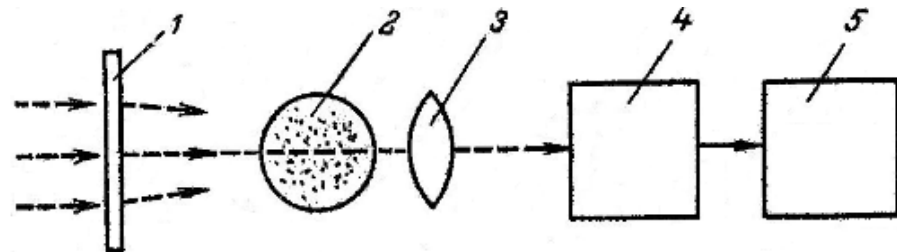


Рис. 2.11 – Установка для відновлення зображення по голограмах часток пилу: 1 – голограма; 2 – відновлюване зображення; 3 – лінза; 4 – телевізійна камера; 5 – телевізійний екран.

За допомогою методу голографії можна вимірювати розміри часток в інтервалі 0,1 – 1000 мкм при контролі забруднення атмосферного повітря на великих відстанях. При цьому методі виключається збурювання потоку й можна проводити вимірювання при зміні швидкості руху часток. Крім того, метод голографії дозволяє вивчати надійність інших методів вимірювання.

Особливо ефективне використання для реєстрації швидко рухаючих часток методу імпульсної лазерної голографії [22,24]. Зйомка часток у будь – якому обсязі за допомогою голографічної установки здійснюється із часом освітлення 10^{-8} с.

2.7. Електричні методи контролю дисперсних часток

Метод заснований на здатності пилових часток електризуватися при зіткненні із твердим матеріалом.

2.7.1 Контакт-електричний метод

Основними елементами пиломіра, заснованого на контакто – електричному методі, являються електризатор, де відбувається зарядка пилових часток, і токознімний електрод, якому частки передають свій заряд. При цьому сила струму в ланцюзі електрода являється мірою концентрації часток пилу.

Для зарядки часток використовуються наступні види електризації: статикоелектрична (електризація при поділі твердого тіла на частини); балоелектрична (електризація при зіткненні твердих тіл); трибоелектрична (електризація при відносному переміщенні дотичних твердих тіл).

На електризацію часток пилу при взаємодії їх з перешкодами впливають фізико-хімічні властивості часток пилу й матеріалу, з якого виконаний електризатор, дисперсний склад пилу, швидкість руху часток, їх температура й вологість.

Кількість електрики Q , що утворюється при терті двох тіл, прямо пропорційна різниці їх проникностей:

$$Q = HS(\varepsilon_1 - \varepsilon_2), \quad (2.43)$$

де H – константа, що залежить від стану поверхні, умов середовища й інших факторів;

S – поверхня зіткнення тіл; ε_1 і ε_2 – діелектричні проникності дотичних тіл.

Вплив дисперсного складу пилу на електризацію часток пояснюється тим, що для часток пилу з високим питомим електричним опором величина

заряду визначається числом контактів з перешкодою й характером руху часток щодо перешкоди. Останній, у свою чергу, залежить від розмірів і форми часток, швидкості їх руху й інших факторів.

При обертанні частки масою m на неї діє відцентрова сила

$$F = mv^2/R, \quad (2.44)$$

де v – швидкість обертового руху частки;

R – радіус каналу, уздовж якого рухається частка.

При русі частки по гвинтовій лінії швидкість v становить

$$v = v_{max} \sin \varphi, \quad (2.45)$$

де v_{max} – максимальна швидкість поступального руху частки; φ – кут між дотичною до гвинтової лінії й площиною, перпендикулярною осі гвинта.

Підставивши значення v у рівняння (2.44), одержимо:

$$F = mv_{max}^2 \sin^2 \varphi / R \quad (2.46)$$

Відношення відцентрової сили F до радіальної складової сили тяжіння є критерієм притиснення Π частки до поверхні електризатора:

$$\Pi = F/F_{\text{рад}}$$

При $\Pi < 1$ рух частки має стрибкоподібний характер, при цьому частка здобуває електричний заряд тільки в момент зіткнення зі стінкою електризатора. При $\Pi > 1$ стрибкоподібний рух частки переходить у гвинтоподібний і частка на всьому шляху руху через електризатор контактує з його поверхнею, отже, заряд, що здобувається часткою, зростає.

Вплив швидкості руху часток на їхній заряд досить суттєво. Спочатку з ростом швидкості потоку сумарний заряд часток зростає, що можна пояснити збільшенням сили взаємодії часток пилу з поверхнею електризатора. При цьому виникнення зарядів обумовлене балоелектричною і трибоелектричною електризацією.

При деякій швидкості потоку заряд досягає максимального значення, відповідного до осьової швидкості обертового руху потоку (105 – 115 м/с). Далі зі збільшенням швидкості заряд зменшується, тому що більша частина часток уже не встигає контактувати з поверхнею електризатора й проскакує

повз нього. Для кожного типу електризації й кожної конструкції первинного вимірювального перетворювача існує оптимальна область швидкостей руху, при яких частки пилу заряджаються до максимального значення.

Вплив вологості на величину заряду часток обумовлене тим, що частки адсорбують вологу. При відносній вологості від 15 до 90% на поверхні частки утворюється плівка води, товщина якої не перевищує товщину подвійного молекулярного шару. Подальший ріст вологості не викликає збільшень кількості адсорбованої води й не впливає на процес зарядки часток.

Температура також впливає на величину й полярність заряду часток. Так, заряди часток, нагрітих до 80 – 90 °С, вище зарядів холодних часток в 1,2 – 1,4 рази. Це обумовлене тим, що при нагріванні частки втрачають поверхневу вологу. Інтервал температури, який відповідає максимальній величині заряду часток і мінімальної залежності його від температури, складає 100 – 120 °С. При цих температурах виключається й вплив краплинної води, яка може бути в потоці.

Параметри первинного вимірювального перетворювача також впливають на чутливість методу. Установлено, що для одержання максимальної чутливості необхідно, щоб довжина електризатора й струмознімного електрода була рівна 30 мм. При меншій довжині частки пилу не встигають контактувати з поверхнею електризатора, при більшій довжині збільшується "крок" гвинта пилегазового потоку і його траєкторія переходить від гвинтоподібної до поступальної, що приводить до іншого виду електризації й зміни знаку заряду часток. Все це зменшує сумарний заряд часток.

При дотриманні оптимальних значень усіх впливаючих величин (швидкості, температури, вологості, матеріалу електризатора й параметрів первинного вимірювального перетворювача) залежність між масовою концентрацією часток пилу й силою струму в ланцюзі струмознімного електрода має лінійний характер до 2,5 г/м³. При цих концентраціях основна

маса часток контактує із внутрішньою поверхнею електризатора й струмознімним електродом і сумарний заряд пропорційний концентрації часток. Подальше збільшення концентрації пилу приводить до насичення струму в ланцюзі струмознімного електрода.

2.7.2. Ємнісний метод

Цей метод заснований на вимірі зміни ємності конденсатора при введенні часток пилу між його пластинами. Якщо конденсатор увімкнути в ланцюг коливального контуру, частота власних коливань якого порівнюється із еталонною, то по піковій різниці частот можна судити про концентрацію пилу.

При використанні ємнісного методу слід ураховувати електричні властивості пилу. Провідний пил не тільки змінює ємність конденсатора, вона може також спричиняти зміни інших параметрів коливального контуру.

Нехай частка пилу обсягом об'ємом V_q , має електричний опір R і коефіцієнт електричної поляризації [22] $\chi_e = p/(EV_q)$ (де p – електричний дипольний момент; E – напруженість електричного поля).

При введенні між пластинами конденсатора частки пилу завдяки поляризаційному поверхневому заряду на пластинах наводиться додатковий заряд

$$\Delta q = p/l, \quad (2.47)$$

де l – відстань між пластинами конденсатора.

При малому значенні R ємність конденсатора зміниться на деяке значення ΔC :

$$\Delta C = \chi_e V_q C_0 / (\varepsilon_0 V), \quad (2.48)$$

де V – об'єм між пластинами конденсатора; ε_0 – діелектрична проникність повітря; C_0 – ємність конденсатора при відсутності пилу.

При великому, але не нескінченному значенні електричного опору частки необхідно враховувати діелектричні втрати в частці, що змінюють добротність конденсатора, а отже, і контуру. Еквівалентна схема коливального контуру для даного випадку приведена на рисунку 2.12а. До вимірювального конденсатора паралельно підключений елемент ланцюга з

активним опором і додаткова ємність C . Повний комплексний опір Z_{AB} між точками підключення конденсатора дорівнює:

$$Z_{AB} = \frac{1+i\omega CR}{\omega[i(C_0+C)-\omega C_0 CR]}, \quad (2.49)$$

де ω – частота коливань контуру.

При $\omega CR \ll 1$ рівняння (2.49) можна уявити у вигляді:

$$Z_{AB} = \frac{1}{i\omega(C_0+C)} + \frac{RC^2}{(C_0+C)^2} \quad (2.50)$$

Еквівалентна ємність ланцюга $(C_0 + C)$ збільшується за рахунок додаткової ємності, обумовленою часткою пилу. При цьому також збільшується активний опір:

$$\Delta R = \frac{RC^2}{(C_0+C)^2} \quad (2.51)$$

Енергетичні втрати в частці пилу тим нижче, чим менше ємність. Крім того, ці втрати мають місце не у всьому просторі між пластинам конденсатора, а лише в місці знаходження частки.

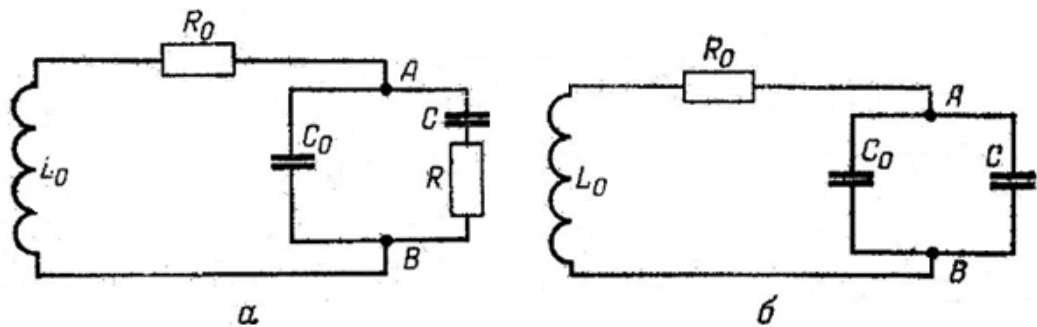


Рис. 2.12 – Еквівалентна схема коливального контуру при наявності в конденсаторі провідного (а) і діелектричного (б) пилу: L_0, C_0, R_0 – індуктивність, ємність і активний опір коливального контуру; R – активний опір частки пилу; C – додаткова ємність.

При $\omega CR \gg 1$ рівняння (1.2.49) можна представити у вигляді:

$$Z_{AB} = \frac{1}{i\omega C_0} + \frac{1}{\omega^2 C_0 R} \quad (2.52)$$

У цьому випадку резонансна частота коливального контуру змінюється незначно, а збільшується в основному активний опір, вносячи енергетичні втрати й погіршуючи добротність конденсатора.

Втрати тим більші, чим кращою провідністю володіє частка пилу. При наявності усередині конденсатора декількох часток пилу необхідно враховувати взаємодію між ними.

Для діелектричного пилу еквівалентна схема коливального контуру (рисунк 1.2.12б) складається із двох паралельно включених ємностей C_0 і C . У цьому випадку, повний комплексний опір конденсатора

$$Z_{AB} = \frac{1}{(C_0 + C)\omega i} \quad (2.53)$$

Являється чисто уявним, тобто наявність частки пилу з діелектрика приводить тільки до зсуву резонансної частоти на $\Delta\omega = \omega C / (2C_0)$.

Таким чином пил, що не проводить, змінює тільки частоту, а провідний – частоту й добротність контуру. Вимірявши зміну зазначених параметрів резонансного контуру, можна судити про концентрацію провідного й діелектричного пилу.

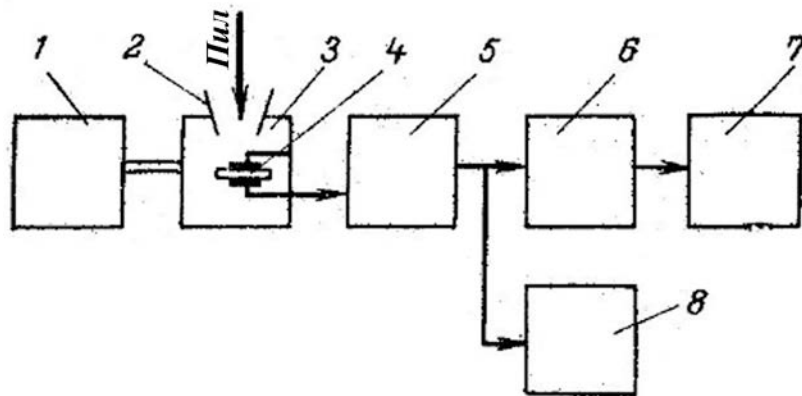


Рис. 2.13 – Схема п'єзоелектричного лічильника часток: 1– повітродувка; 2 – сопло; 3 – вимірювальна камера; 4 – п'єзоелектричний елемент; 5 – підсилювач; 6 – аналізатор імпульсів; 7 – лічильник імпульсів; 8 – реєструвальний пристрій.

На основі ємнісного методу можна створити лічильник часток. Для цього в трубку, у яку подають запилене повітря, установлюють ємнісний первинний вимірювальний перетворювач. Останній включають у резонаторний контур. Частки пилу, проходячи через ємнісний перетворювач,

генерують імпульси, які підсилюють імпульсним підсилювачем і подають на індикатор імпульсів.

2.7.3. П'єзоелектричний метод

Цей метод може бути використаний для вимірювання рахункової концентрації часток пилу шляхом підсумовування електричних імпульсів, що виникають при зіткненні часток з п'єзокристалом. На рисунку 2.15 показана схема п'єзоелектричного лічильника часток. Пилогазовий потік за допомогою повітрорудки 1 прискорюється в соплі 2 і надходить у вимірювальну камеру 3, де обтікає розташований під соплом п'єзоелектричний елемент 4. Частки пилу внаслідок інерційності відхиляються від основного потоку й удараються об поверхню п'єзoeлемента. При цьому на його електродах виникають імпульси напруги, амплітуда яких залежить від розміру часток. Електричні імпульси підсилюються й реєструються аналізатором імпульсів.

Рівняння руху частки в газовому потоці може бути записане у вигляді:

$$\frac{mdv}{dt} - F_A = 0, \quad (2.53)$$

де F_A – аеродинамічна сила опору.

Для сферичних часток сила F_A складає:

$$F_A = v\pi\rho_q d^2 v^2 / 8, \quad (2.54)$$

де v – аеродинамічний коефіцієнт, що залежить від числа Рейлолдса; для $6 < Re < 100$ коефіцієнт v визначається емпіричним виразом $v = 27 Re^{-0,84}$; $v = v_r - v_q$ швидкість руху частки щодо потоку.

Розрахунки, проведені на ЕОМ, показали [27], що локальний коефіцієнт захоплення часток $\beta = v_r - v_q$ залежить від параметрів частки, швидкості потоку й розмірів сопла. Коефіцієнт захоплення зростає зі зменшенням розмірів і щільності частки, швидкості потоку й зі збільшенням довжини каналу сопла. При швидкостях потоку 50 – 100 м/с коефіцієнт захоплення частки на виході сопла $\beta_{max} = 1$ незалежно від розмірів і щільності часток.

Однак для досягнення таких швидкостей потрібне сопло дуже великої довжини, що ускладнює конструкцію пиломіра й збільшує споживану потужність повітродувки. Більш доцільно використати сопло малої довжини й заздалегідь урахувати залежність β_{max} від діаметра й щільності частки. Так, для сопла довжиною 20 і 50 мм залежність $1/\beta_{max}$ від діаметра частки може бути апроксимована прямою.

Максимальна сила удару сферичної частки радіусом r про напівнескінченну поверхню твердого тіла в наближенні теорії пружності дається виразом:

$$F_{уд} = \frac{2}{3} r^2 \sqrt[5]{10^3 \pi^3 \rho_{\text{ч}}^3 v_{\text{уд}}^{6/5} (v_{\text{ч}} + v_{\text{т}})^2}, \quad (2.55)$$

де $v_{\text{ч}}$ і $v_{\text{т}}$ – коефіцієнти пружності матеріалів частки й твердого тіла; $v_{\text{уд}}$ – швидкість частки в момент удару.

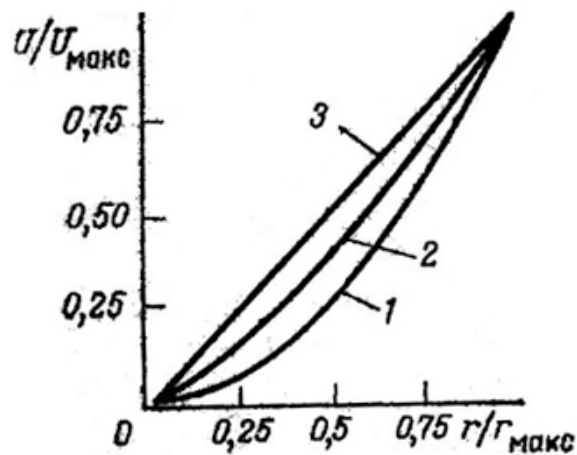


Рис. 2.14 – Нормована амплітудна характеристика п'єзоелектричного вимірювального перетворювача для часток пилю різної щільності: 1 – $\rho_{\text{ч}} = 0$; 2 – $\rho_{\text{ч}} = 10^3 \text{ г/см}^3$; 3 – $\rho_{\text{ч}} = \infty$.

Амплітуда електричного імпульсу на виході п'єзoeлементa дорівнює:

$$U = k_n F_{\text{уд}} / C_e, \quad (2.56)$$

де k_n – п'єзoeлектричний модуль;

C_e – еквівалентна ємність п'єзoeлементa.

Нормована амплітудна характеристика первинного вимірювального перетворювача може бути записана у вигляді:

$$\frac{U}{U_{max}} = (r/r_{max})^2 [\beta_m(r)/\beta_m(r_{max})]^{6/5} \quad (2.57)$$

Залежність (2.57) була розрахована для циліндричного сопла довжиною 20 мм при швидкості повітряного потоку 50 м/с і максимальному радіусі часток $r_{max} = 20$ мкм (рис. 2.14).

Амплітудна характеристика у цьому випадку нелінійна, її форма змінюється зі зміною пружних властивостей щільності частки.

Конструктивне виконання п'єзоелектричного лічильника часток може бути різним. У варіанті, наведеному на рис. 2.15, частки, прискорюються до швидкості, близької до звукової, і надходять у пропускний канал 2, де вони бомбардують п'єзоперетворювач 1. Утворений під дією бомбардування вихідний сигнал, що знімається з перетворювача, відповідає одній частці. Число імпульсів підсумовується.

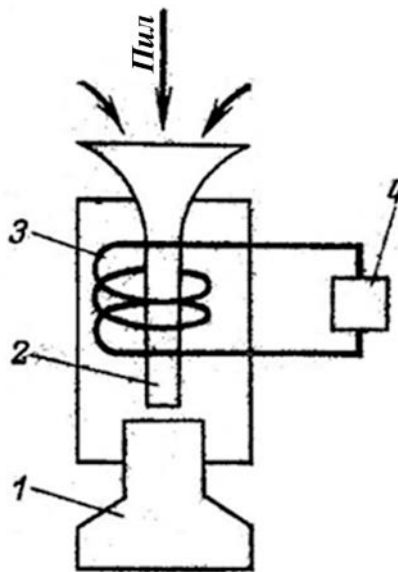


Рис. 2.15 – Схема п'єзоелектричного лічильника: 1 – п'єзоперетворювач; 2 – пропускний канал; 3 – коливальний контур; 4 – підсилювач.

У п'єзоелектричному лічильнику (рис. 2.16) первинний вимірювальний перетворювач складається з вимірювального й компенсаційного 2 п'єзоелектричних елементів, поміщених в ізоляційний матеріал 3, який

демпфірує випадкові зміни тиску. Робоча поверхня вимірювального п'єзоелемента утворює з напрямком потоку кут, відмінний від 90° , для запобігання повторного влучення на елемент відбитих часток.

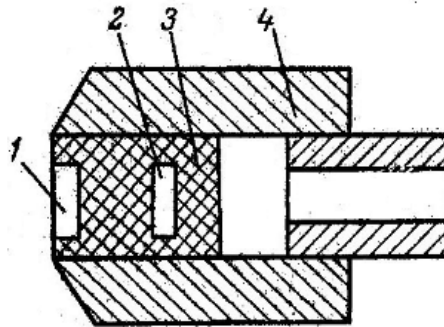


Рис. 2.16 – Конструкція п'єзоелектричного лічильника з компенсаційним п'єзоперетворювачем: 1,2 – вимірювальний і компенсаційний п'єзоперетворювачі; 3 – ізолятор; 4 – корпус.

П'єзоелемент можна розташувати поза пилогазовим потоком, з'єднавши його із пружним стрижнем, який закріплений у стінці газоходу [23]. Стрижень може бути виготовлений з металу, нейлону або гуми.

2.8. Акустичний метод

Акустичний метод визначення концентрації пилу заснований на вимірюванні змін параметрів акустичного поля при наявності часток пилу в просторі між джерелом і приймачем звуку. Втрати ультразвукової енергії, обумовлені впливом зважених твердих часток, залежать від ряду фізичних параметрів: радіуса часток r , їхньої щільності $\rho_{\text{ч}}$ і концентрації C , пружних сталих Ламе λ, μ часток, коефіцієнта пружності $\beta_{\text{г}}$ газового середовища, у якому зважені частки пилу, щільності середовища $\rho_{\text{г}}$ і в'язкості $\eta_{\text{г}}$, швидкості c і частоти ω ультразвуку в пилогазовому середовищі.

Для кількісної оцінки зазначених втрат вводять коефіцієнт додаткового поглинання ультразвуку який для малих концентрацій пилу C рівний:

$$\chi = \chi_{\text{т}} + \chi_{\text{р}} = C\xi_{\text{т}} \int_0^{\infty} \frac{1}{r} n(r) dr + C\xi_{\text{р}} \int_0^{\infty} r^3 n(r) dr, \quad (2.58)$$

де $n(r)$ – щільність масового розподілу часток по розмірах; χ_t характеризує втрати ультразвукової енергії в акустичному тракті за рахунок тертя, що виникає при переміщенні часток щодо середовища при $\omega \gg 2\eta_r/(r^2\rho_r)$; χ_p характеризує розсіювання ультразвукової енергії частками при $c/\omega > r$;

$$\xi_t = 9/c \left(\frac{\rho_q - \rho_r}{\rho_r + 2\rho_q} \right)^2 \sqrt{\frac{\omega\eta_r}{2\rho_q}};$$

$$\xi_p = \frac{\omega^4}{2c^4} \left[\left(\frac{\rho_q - \rho_r}{\rho_r + 2\rho_q} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(1 - \frac{3\beta_r}{3\lambda + 2\mu} \right)^2 \right]$$

З рівняння (2.58) випливає, що вимірювання коефіцієнта додаткового поглинання χ дає можливість визначити концентрацію часток пилу.

При цьому доцільно визначати χ однієї й тією ж акустичною системою в чистім і запиленім запиленому повітрі й потім знаходити різницю отриманих значень:

$$\chi = \chi_2 - \chi_1 = [\ln(P_0/P_2) - \ln(P_0/P_1)]/l, \quad (2.59)$$

де χ_1 і χ_2 – коефіцієнти поглинання, вимірювані однією й тією ж акустичною системою в запиленому й чистому повітрі;

P_0 – амплітуда акустичного тиску, збуджувана випромінювачем;

P_2 і P_1 – амплітуда акустичного тиску, який реєструється приймачем для запиленого й чистого повітря;

l – акустична довжина шляху від випромінювача до приймача.

Одним з варіантів реалізації акустичного методу може бути пиломір, первинний вимірювальний перетворювач якого виконаний у вигляді кільцевої камери 1 з фільтруючою перегородкою 9 (рис. 2.17). Остання перекриває доступ часток пилу в компенсаційну камеру 10. Кільцева камера 1 уводиться в газохід так, щоб робоча порожнина її була перпендикулярна пило газовому потоку.

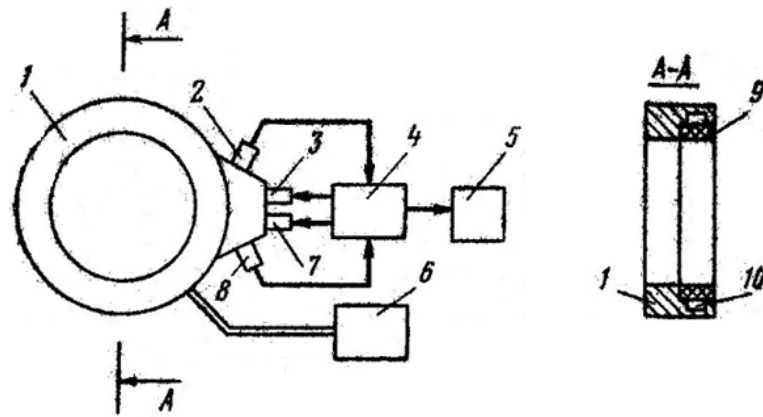


Рис. 2.17 – Схема акустичного пиломіра: 1 – вимірювальна кільцева камера; 2, 8 – приймачі ультразвуку; 3, 7 – випромінювачі ультразвуку блок порівняння; 5 – пристрій, що реєструє; 6 – насос; 9 – фільтруюча перегородка; 10 – компенсаційна кільцева камера.

При вмиканні насоса 6 компенсаційна камера через фільтруючу перегородку 9 заповнюється очищеним повітрям. Випромінювачі 3 і 7 одночасно посилають імпульси ультразвуку в камеру 10 і порожнина газоходу. Від випромінювача 3 ультразвук спрямовується усередину камери 10 і, багаторазово відбившись від її стінок, потрапляє на приймач 2. Від випромінювача 7 ультразвук спрямовується на внутрішню поверхню газоходу й після багаторазового відбиття від неї потрапляє на приймач 8. Так як ультразвук неодноразово проходить поперечний переріз пилогазового потоку в різноманітних напрямках, то приймач ультразвуку 8 реєструє деяке усереднене значення ступеня загасання ультразвуку в досліджуваному пилогазовому потоці. По різниці ступеня загасання ультразвуку в газоході й компенсаційній камері, заповненої очищеним повітрям, судять про концентрацію пилу в потоці.

На результати вимірювання концентрації пилу акустичним методом впливають зміни швидкості й температури пилогазового потоку, тиску в газоході, вологості, температури й дисперсного складу пилу. До недоліків методу слід віднести складність вимірювальної апаратури.

Висновки до розділу 2.

Зроблено аналіз методів вимірювання концентрації твердих часток що засновані на здатності пилових часток електризуватися при зіткненні з твердим матеріалом.

Проаналізовано недоліки та переваги кожного з методів.

Для виконання магістерської роботи потрібно розробити макет вимірювальної установки та провести апробацію методики вимірювань.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МАКЕТУ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ТА АПРОБАЦІЯ МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАНЬ

На сьогоднішній день існує багато методів та засобів вимірювання концентрації твердих часток. У даний час, представлені на ринку системи контролю твердих часток атмосферного повітря застосовуються, в основному, для конкретних вузьких спеціалізованих задач, потребують пробопідготовки і залежать від суб'єктивної інтерпретації результатів аналізу спостерігачем.

Авторами в роботі [5] описано інфрачервоні газоаналізатори та пиломіри що працюють за принципом селективного поглинання інфрачервоного випромінювання. Газ поглинає енергію певних довжин хвиль в інфрачервоній області спектра, інші хвилі проходять і при цьому не поглинаються. Наприклад, область поглинання окису вуглецю лежить між 4,5-5,0 мкм.

Авторами в статті [9] на основі проведених досліджень отримано багатопараметричний функціонал, який визначає імовірнісні характеристики критичних меж вибуховості пило-газової суміші в шахтному повітрі оптичними методами аналізу. Завдяки даному функціоналу розроблено структуру комп'ютеризованої ІВС контролю концентрацій вибухонебезпечних компонент рудничної атмосфери, що включає автоматичний канал вимірювання концентрації ($0\div 3$) г/м³ та дисперсності ($1\div 10$) мкм вугільного пилу, концентрації метану ($0\div 4$) об.%, температури (від +5 до +34) °С та вологості повітря ($0\div 10$) г/м³. Ключові слова: вимірювач, вугільний пил, оптико-абсорбційний, концентрація, алгоритм, вибуховість.

У статті [12] розглянуто переносний вимірювач оптичної густини ВОГ-2, призначений для контролю оптичних характеристик пило газових сумішей та масової концентрації зважених частинок (пилу) у димових газах. Основні сфери застосування - інспекційний контроль пилу у викидах ТЭС, котлоагрегаторів; вимірювання концентрації пилу в технологічних процесах;

моніторинг навколишнього середовища. Комплексне вимірювання концентрації токсичних газів і пилу у викидах підприємств.

В роботі [8] описано оптичний метод для безперервного автоматичного контролю концентрації пилу як в атмосфері, так і у димових газах промислових підприємств без попереднього відбору. Метод заснований на ослабленні світла за рахунок його поглинання і розсіювання при проходженні через досліджуване пило-газове середовище.

Доцільним є вдосконалення методик контролю дисперсного складу атмосферного повітря із застосуванням швидких та точних методів експрес контролю дисперсного складу повітря, найбільш ефективними із яких є оптичні методи аналізу у ультрафіолетовій (УФ), видимій та ближній інфрачервоній (БІЧ) області спектру. Вибір спектрального діапазону та методики вимірювань при застосування методів та засобів оптичної спектрометрії здійснюється із врахування хімічного складу зразка та умов проведення вимірів.

3.1 Аналітичний огляд сучасних приладів для вимірювання концентрації твердих часток в промислових викидах

3.1.1. Огляд переносного вимірювача запиленості Gravimat SHC500

Прилад для комплексного контролю та гравіметричних порівняльних вимірювань. Частина потоку газу всмоктується ізокінетично через зонд з газозабірною насадкою (контроль у реальному часі). Вміст пилу визначається шляхом зважування мішка до і після забору проби газу [24]. Даний вимірювач володіє наступними можливостями:

- безперервне безконтактне вимірювання безпосередньо в пилогазовому потоці;
- різні вимірювальні принципи, такі як коефіцієнт пропускання, розсіювання світла і гравіметричний;
- вимірювання концентрацій пилу незалежно від швидкості потоку газу, вологості або кількості пилу;
- тривалий термін експлуатації без сервісного обслуговування;

- технічне обслуговування за запитом системи самодіагностики приладу;
- можливість збільшення числа входів / виходів завдяки модульній конструкції газоаналізатора.



Рис.3.1 – Переносний вимірювач запиленості Gravimat SHC500.

Таблиця 3.1. Технічні дані переносного вимірювача запиленості SHC500.

Вимірювані значення	Запиленість в мг/м^3 (робочий стан, стандартний стан)
Вимірювальний діапазон	0 ... 50 000 мг/м^3
Вимірювальний принцип	гравіметричний
Сертифікація	VDI Guideline 2066, ISO 9096, EN 13284-1,
Категорія захисту	IP 65
Інтерфейс	RS232
Системні модулі	зонд з газозбірною насадкою, набір пилозбірників, блок–обчислювач, (переносний комп'ютер).
Тестова функція	функція самодіагностики

Основні переваги вимірювача:

- компактна вимірювальна система, легка для транспортування;
- запатентована система забору проби без втрат пилу гарантує високу точність вимірювань навіть при малих концентраціях пилу;

- автоматичний запис результатів тестування, контроль системи і зберігання даних вимірювань;
- автоматичне регулювання ізокінетичності в реальному часі;
- результати вимірювань можуть бути отримані відразу після забору пилю (залежить від вбудованої автоматики).

3.1.2. Лазерний вимірювач запиленості Dusthunter T200

Вимірювач запиленості DUSTHUNTER T200 застосовується для автоматичного і безперервного вимірювання концентрації твердих частинок в газових середовищах. Прилад спроектований для роботи у важких промислових умовах [25].



Рис. 3.2 – Вимірювач запиленості Dusthunter T200.

Вимірювач запиленості Dusthunter T200 працює за принципом вимірювання коефіцієнта пропускання світла і є точною оптичною системою.

Вимірювана фізична величина – коефіцієнт пропускання. Прилад може бути налаштований на виведення значень коефіцієнта пропускання, непрозорості, оптичної щільності або масової концентрації (мг/м^3).

Вимірювання в одиницях масової концентрації можливо після проведення градуювання приладу гравіметричним методом. Калібрувальні коефіцієнти вводяться до вимірювача запиленості Dusthunter T200 за допомогою програми параметризації, яка входить у стандартний комплект поставки.

Технічні характеристики Dusthunter T200

Вимірювальний принцип	Вимірювання коефіцієнта пропускання світла			
Вимірювані величини	Коефіцієнт пропускання	Непрозорість	Оптична щільність	Концентрація пилу *
Вимірювальний діапазон:	min 100..90% max 100...0%	min 0...10% max 0...100%	min 0..0,045 max 0...2,0	min 0..200мг/м ³ max 0...10г/м ³
Похибка вимірювання	± 2% від повної шкали			
Вимірювальне відстань	0.5 ... 12 м			
Макс.температура газу	600 ° С			
Навколишня температура	-40 ... +60 ° С			
Вихідні сигнали	- 3 аналогових виходи 0 / 4 - 20 мА; - 5 статусних реле (з "сухим" контактом)			
Інтерфейси	USB, RS 232, RS 485 (опція), Ethernet (опція)			
Напруга живлення	Аналізатор: ~ 220 В, 50 Гц; Вузол продувного повітря: ~ 380 В, 50 Гц			
Потужність	Аналізатор: близько 300 Вт; Вузол продувного повітря: 370 Вт			
Група виконання	IP 66			
Гарантія	12 місяців			

Після введення калібрувальних коефіцієнтів вимірювач запиленості Dusthunter T200 розраховує масову концентрацію за вимірюваним значенням оптичної щільності.

3.1.3. Оптичний вимірювач запиленості FWE 200

Вимірювач запиленості FWE 200 працює за принципом вимірювання розсіювання світла на твердих частках. Вимірювана фізична величина – одиниці розсіювання світла. Прилад може бути налаштований на виведення значень одиниць розсіювання світла або масової концентрації (мг/м³).

Вимірювання в одиницях масової концентрації можливо тільки після проведення градуювання приладу гравіметричним методом.



Рис. 3.3 – Вимірювач запиленості FWE 200

Таблиця 3.3.

Технічні характеристики вимірювача запиленості FWE 200.

Вимірювальний принцип	Вимірювання коефіцієнта розсіювання світла
Джерело випромінювання	лазер
Вимірювані величини	концентрація пилу
Вимірювальний діапазон:	мін. 0 ... 5 мг/м ³ макс. 0 ... 200 мг/м ³
Час відгуку	0,1 ... 600 сек
Внутрішній діаметр газоходу	> 0,4 м
Макс. вологість газу	до 1%
Макс. температура газу	200 ° С
Відносний робочий тиск	± 2 кПа
Навколишня температура	–20 ... +55 ° С
Вихідні сигнали	– 1 аналогових виходу 0 / 4 – 20 мА; – 4 релейних виходу;
Інтерфейси	RS 232
Напруга живлення	~ 230 В, 50 Гц;
Потужність	макс. 2,5 кВт
Група виконання	IP 54, електронний блок IP 65
Гарантія	12 місяців

Калібрувальні коефіцієнти вводяться в прилад за допомогою програми параметризації, яка входить у стандартний комплект поставки.[25]

3.1.4. Аналітичний огляд вимірювача концентрації пилу DR 300-40

DR 300-40 – особливо чутливий пиломір для вимірювання малих концентрацій пилу, особливо на заводах по спалюванню відходів.

Пиломір DR 300–40 працює за принципом вимірювання розсіяного світла. Модульоване світло від галогенової лампи висвітлює частинки пилу в газоподі. Розсіяне світло, відбите від цих частинок вимірюється і оцінюється пиломіром.

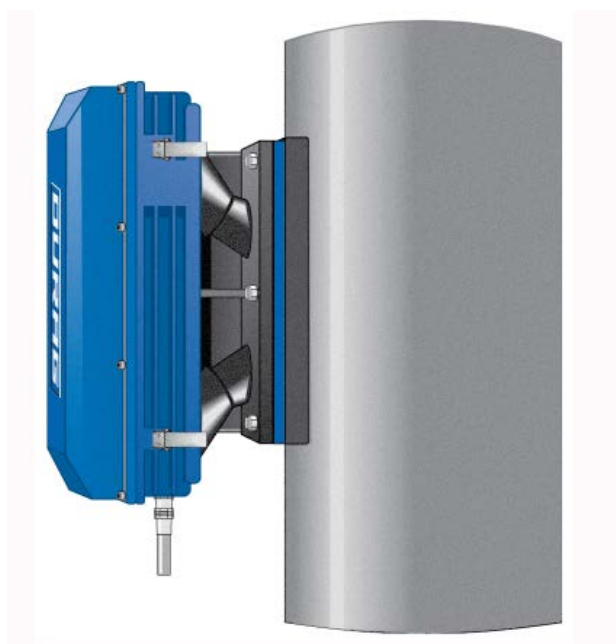


Рис. 3.4 – Прилад для вимірювання концентрації пилу DR 300-40.

Особливості пиломіра DR 300-40:

- вимірювання за місцем, безперервне вимірювання
- автоматична перевірка і корекція виміряних величин
- автоматична самокалібровка пиломіра кожні 4 години
- оптика та електроніка знаходиться в герметичному корпусі – виключається проникнення димових газів всередину корпусу пиломіра
- обслуговування пиломіра спрощене завдяки оптимальному підведенню чищення повітря перед нагрітими кінцевими оптичними елементами

- прямий доступ до всіх параметрів і налаштувань пиломіра через дисплей оператора

Пиломір застосовується для вимірювання концентрації тонкого пилу в технологічних процесах спалювання відходів різної природи, моніторингу стану фільтрів та вимірювання кількості викидів на заводах з утилізації відходів і на електростанціях

Пиломір DR 300-40 забезпечує втоматичний вибір діапазону вимірювання пиломіра для вимірювання пилу відповідно до європейського стандарту 17 BImSchV. Прилад має кожух для захисту пиломіра від атмосферних впливів, для зовнішньої установки. Комплектація вимірювача включає заслінки для захисту вимірювального пристрою пиломіра у разі відмови подачі повітря очищення після очищення. Модифікація вимірювача може бути виконана для високих температур (до 500°C) із додатковими надлишковими системами очищення повітря.

3.1.5. Функціональні особливості стаціонарного вимірювача контролю запиленних газових потоків ПІКП–Т

Пиломір ПІКП-Т призначений для безперервного контролю якості роботи пристроїв різного типу дії, що фільтрують, а також для технологічного і екологічного моніторингу (рис. 3.5).



Рис. 3.5 – Стаціонарний прилад контролю запиленних газових потоків ПІКП–Т.

Основні технічні характеристики вимірювача ПКП-Т.

Характеристики	Значення	Примітка
Діапазон вимірів масової концентрації пилу, мг/м ³	0 – 3000	по окремому замовленню 0 – 75000
Діаметр твердих часток, що детектуються, мкм	від 0,3	
Покази	мг/м ³ або %	
Час прогрівання не більш, хв	5	
Живлення, В	220 (50 Гц)	потужність 10 В–А
Стандартний аналоговий сигнал, мА	0 – 5 або 4 – 20	вибирається споживачем
Цифровий вихід	RS485	MODBUS–RTU
Температура оточуючого середовища, °С	від – 40 до + 50	за замовленням від – 50 до + 50
Параметри аналізованого середовища температура °С вологість % швидкість газового потоку, м/с	0 – 200 до 98 от 4 до 30	
Ступінь захисту	IP65	по ГОСТ 14254-95

Сфера застосування пиломіра: безперервний екологічний і технологічний контроль вмісту зважених часток в газових потоках на підприємствах теплоенергетичної, металургійної, скляної, хімічної, нафтохімічної, харчової промисловостей, при виробництві будівельних матеріалів і в інших галузях народного господарства. Принцип роботи – трибоелектричний. Режим роботи – безперервний

3.2 Огляд патентної інформації для розробки пиломіра

3.2.1 Пристрій для вимірювання запиленості газів

Винахід відноситься до вимірювальної техніки, призначений для визначення концентрації пилу і може бути використано для контролю забрудненості довкілля і в інших галузях техніки.

Мета винаходу – підвищення точності і чутливості вимірів. У приладі, що містить повітряний проточний конденсатор 2, термоелектричний блок, що складається з нагрівачів, підключених до джерела 12 живлень, вимірника 13 ємностей, приєднаного до обклашок 4, спонукача тяги 1 (електродвигуна з вентилятором додатково введений другий повітряний конденсатор 6, встановлений послідовно з першим через теплоізоляційні кільця 10 і пробку 11. Нагрівачі 5 і 9 сполучені послідовно і встановлені відносно біля внутрішньої обкладки першого конденсатора 2 і зовнішньої обкладки другого конденсатора 6. Частки пилу, осідаючи під дією термофореза, змінюють ємність конденсатора пропорційно їх концентрації.

Формула винаходу. Пристрій для вимірювання запиленості газів, що містить послідовно встановлені по ходу газового потоку повітряний проточний циліндричний конденсатор, обкладки якого виконано у вигляді двох коаксіальних циліндрів, термоелектричний блок, з'єднаний з обкладками конденсатора шляхом теплового контакту, установлений перед конденсатором збудник витрати пилогазового потоку у вигляді вентилятора з електродвигуном, джерело живлення, підключене до термоелектричного блоку.

Вимірювальний прилад, з'єднаний з обкладками конденсатора, що відрізняється тим, що, з метою підвищення точності і чутливості, у нього додатково введений другий повітряний проточний циліндричний конденсатор того ж діаметра, який розміщений послідовно й співвісно з першим.

Між відповідними обкладками першого й другого конденсаторів установлені теплоізоляційні кільця, а простір між внутрішніми обкладками розділений теплоізолюючою вставкою, внутрішні обкладки обох конденсаторів відповідно електрично з'єднані між собою, а термоелектричний блок виконано у вигляді двох послідовно з'єднаних кільцеві нагрівачів, причому перший нагрівач розташований усередині внутрішньої обкладки першого циліндричного конденсатора, а другий нагрівач – зовні зовнішньої обкладки другого циліндричного конденсатора

3.2.2. Оптичний детектор аерозолів

Винахід стосується аналітичного приладобудування й може бути використаний для реєстрації дисперсних зважених часток у газах або прозорих рідинах.

Метою винаходу є підвищення чутливості вимірювання малих рахункових концентрацій і розмірів високодисперсних аерозолів. Для цього робоча камера у вигляді циліндричної трубки виконана із прозорого для світла матеріалу й розташована усередині об'ємного джерела світла, на одному з торців робочої камери уздовж її осі послідовно розміщені кільцеві діафрагми й фотоприймач, на іншому торці встановлений гаситель випромінювання у вигляді плавно вигнутої трубки, за допомогою якої робоча камера пов'язана з каналом виводу потоку. Причому найближча до камери діафрагма має центральний отвір і два концентричні зазори, за допомогою яких об'єм робочої камери з'єднаний відповідно з каналами додаткового потоку газу, потоку газу з аерозолем і обдувного потоку газу.

Формула винаходу. Оптичний детектор аерозолів містить джерело світла, діафрагми, робочу камеру, з'єднану з каналами вводу й виводу потоку аерозолію й каналом обдувного потоку, гаситель випромінювання зі світлопоглинаючого матеріалу у вигляді плавно вигнутої трубки, фотоприймач, з'єднаний із блоком реєстрації, блок формування потоків і блок електроживлення.

З метою підвищення чутливості вимірювання малих рахункових концентрацій і розмірів високодисперсних аерозолів, робоча камера виконана у вигляді циліндричної трубки із прозорого для світла матеріалу, поміщена усередині об'ємного джерела світла й містить канал додаткового обдувного потоку. Ряд кільцевих діафрагм розміщений послідовно уздовж осі камери на одному з її торців, а найближча до камери діафрагма має центральний отвір і два концентричні зазори, за допомогою яких камера з'єднана відповідно з каналом додаткового обдувного потоку, з каналом введення потоку з

аерозолем і з каналом обдувного потоку, а гаситель випромінювання розташований на протилежному торці камери.

Детектор п.1 відрізняється тим, що робоча камера поміщена усередині балона ультрафіолетової газорозрядної лампи.

3.2.3 Прилад для вимірювання маси і рахункової концентрації часток в потоці рідини або газу

Винахід належить до вимірювальної техніки, призначений для визначення параметрів дисперсних середовищ і може бути використане в машинобудуванні й інших галузях техніки. Мета – підвищення точності й чутливості вимірювань за рахунок зменшення сигналу перешкоди.

Прилад для вимірювання маси й рахункової концентрації часток у потоці рідини або газу містить п'єзоелектричний датчик, що включає п'єзоелектричний кристал, установлений на електроді, диференційний підсилювач і багатоканальний амплітудний аналізатор. Датчик установлений у корпусі з каналом, що забезпечують подачу аналізованого потоку перпендикулярно чутливої поверхні п'єзоелектричного кристала.

Пристрій додатково містить балансуючий ланцюг і двухнапівперіодний детектор. Електрод виконано у вигляді двох груп ідентичних по площі й конфігурації елементів. При цьому кожна група елементів підключена через балансуючий ланцюг до входів диференціального підсилювача, вихід якого через двухнапівперіодний детектор з'єднаний із входом багатоканального амплітудного аналізатора.

Формула винаходу. Пристрій для вимірювання маси й рахункової концентрації часток у потоці рідини або газу включає заземлений і сигнальний електроди, диференційний підсилювач і багатоканальний амплітудний аналізатор. Датчик установлений у корпусі з каналом, що забезпечують подачу аналізованого потоку перпендикулярно чутливої поверхні п'єзоелектричного кристала, з метою підвищення точності й чутливості вимірювань за рахунок зменшення сигналу перешкоди.

Пристрій додатково оснащено балансованим ланцюгом й двухнапівперіодним детектором, сигнальний електрод виконано у вигляді двох груп ідентичних по площі й конфігурації елементів, при цьому кожна група елементів підключена через балансуючий ланцюг до входів диференційного підсилювача, вихід якого через двухнапівперіодний детектор з'єднаний із входом багатоканального амплітудного аналізатора.

3.2.4. Портативний оптичний пиломір

Винахід відноситься до вимірювальної техніки і може бути використано для контролю за вмістом сажистих часток в димових газах промислових топків у вугільній, хімічній, металургійній промисловості, а також в енергетиці.

Цілю винаходу являється підвищення точності та розширення функціональних можливостей. Суть винаходу полягає в тому, що на шляху пробного світлового променя розміщують обтюратор, кінематично зв'язаний з вентилятором, який крутиться в газовому потоці. Обтюратор виконано у вигляді сектора, одна половина якого являється дзеркалом, а друга забезпечена світлопоглинаючими щітками, причому світло вводиться і виводиться із аналізуемого газового потоку за допомогою світловодів.

Формула винаходу. Оптичний пиломір включає оптично зв'язане джерело світла, фокусуючу лінзу й дзеркало, фотоприймачі порівняння й вимірювання включені в мостову електричну схему. Схемне рішення відрізняється тим, що з метою підвищення точності й розширення функціональних можливостей, у нього введені обтюратор між фокусуючою лінзою й дзеркалом і вентилятор, що обертається досліджуванним газовим потоком. Вісь вентилятора кінематично пов'язана з віссю обтюратора, причому обтюратор виконаний у вигляді сектору кола, одна половина якого є дзеркалом, а інша постачена світловідбиваючими щітками для чищення поверхонь фокусуючої лінзи й дзеркала.

3.2.5. Цифровий вимірювач концентрації пилу

Цифровий вимірювач концентрації пилу містить цифровий відліковий пристрій, постійний запам'ятовуючий пристрій, мікроконтролер і перетворювач "код–напруга", які з'єднані між собою через загальну шину, та оптико-механічний блок, що складається із коаксіально розташованих циліндричних патрубків, внутрішній з яких є частиною пилогазопроводу.

Перпендикулярно вертикальній осі циліндричних патрубків врізані два додаткові патрубки, всередині першого з яких послідовно розташовані вздовж основної оптичної осі перше відбиваюче дзеркало і перше скляне вікно, всередині другого додаткового патрубка розміщене друге скляне вікно і перша фокусуюча лінза. Ззовні другого додаткового патрубка оптико–механічного блока розташовані вздовж тієї ж оптичної осі напівпрозора пластина, друга фокусуюча лінза і джерело оптичного випромінювання, в місці фокусування якого розташований обтюраторний диск, який жорстко з'єднаний з синхродвигуном, вхід керування якого приєднаний через перетворювач "код–напруга" до загальної шини,

При цьому напівпрозора пластина оптично з'єднана також через третю фокусуючу лінзу з фотоприймачем, вихід якого підключений до сигнального входу синхронного детектора. Керуючий вхід синхронного детектора з'єднаний з виходом фотоприймача–формувача, вхід якого оптично з'єднаний через обтюраторний диск з виходом світлодіода.

Вихід оптичного каналу відрізняється тим, що в нього додатково введені механізм керування з діафрагмою, силіконова циліндрична камера порівняння з пилогазовою сумішшю заданої концентрації, що змінює форму, третє скляне вікно, направляючий патрубок і поршень з механізмом переміщення, друге і третє рухомі відбиваючі дзеркала з механізмами переміщення. Перетворювач "аналог–код", вхід якого підключений до виходу синхронного детектора, а вихід з'єднаний з загальною шиною, до якого підключені також входи керування механізмів переміщення і вхід механізму

керування з діафрагмою, розташований між третьою фокусуючою лінзою і фотоприймачем.

Описаний вимірювач концентрації пилу забезпечує виключення адитивної та мультиплікативної складових похибки вимірювання, впливу абсолютних значень параметрів функції перетворення фотоприймача та їх відхилень від номінальних значень, а також похибок, обумовлених запотіванням та забрудненням оптичних елементів, що знаходяться в області дії газопилового потоку, на кінцевий результат вимірювання.

Позитивний ефект, отриманий завдяки введенню в цифровий вимірювач концентрації пилу заданої кількості функціональних блоків та їх зв'язків між собою та з відомими блоками, забезпечує підвищення точності визначення концентрації пилу при нестабільній функції перетворення оптичного сигналу в електричний сигнал та при запотіванні і забрудненні оптичних елементів, що розташовані поблизу газопилового потоку.

Таким чином, запропонований цифровий вимірювач концентрації пилу забезпечує вирішення зазначеної задачі і може бути використаний в якості бази розроблюваного пиломіра.

3.3. Вибір функціональної схеми і розрахунок вузлів вимірювача

Для розрахунків, пов'язаних з вибором або оцінкою роботи пилеуловлювачів, потрібні відомості про уявну щільність, знайдену для всієї сукупності часток в пробі, що дозволяє визначити гранулометричний склад зразка. Такі дані можна отримати методом оптичної спектроскопії в прямому світловому потоці із розробкою функції перетворення вимірювального засобу.

В процесі розробки, на основі розглянутих сучасних методів і аналогів, було обрано випромінюючий діод оптичної системи блоку випромінювача німецької фірми «Kingbrigt». Також було обрано діафрагму між лінзою та захисним склом, яка має менший діаметр (50 мм) пропускання світлового потоку, що дає змогу більш точно контролювати світловий потік, створений

для проходження через пилогазове середовище. Живлення приладу забезпечується від напруги 24 В, отриманої від акумулятора.

У первинному вимірювальному перетворювачі приладу світло від блоку випромінювання 1 за допомогою системи напівпрозорої пластини 2, дзеркала 15 та лінз 3,14 формується у два світлові потоки – вимірювальний та порівняльний, які направляються на модулятор 4. Частота модуляції світла, у вимірювальному каналі дорівнює 1,5 кГц, в каналі порівняння – 2,4 кГц.

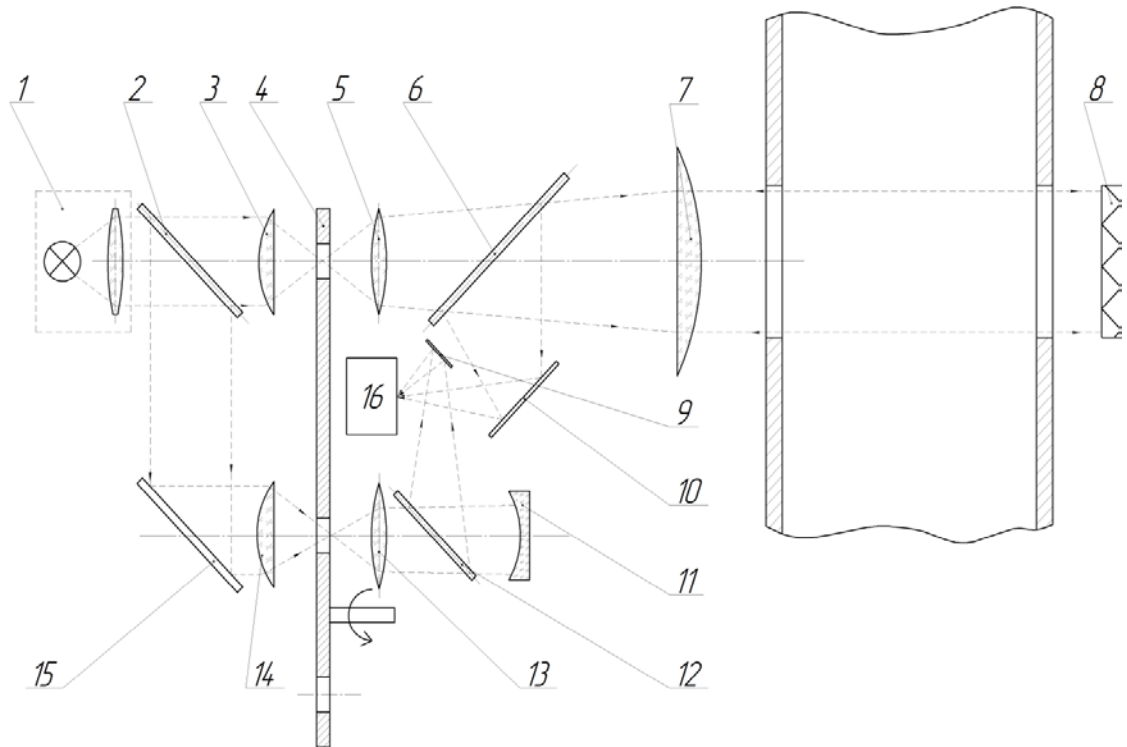


Рис. 3.6.– Оптична схема вимірювача твердих часток у газових викидах промислових підприємств: 1 – блок випромінювача; 2,6,12 – напівпрозора пластинка; 3,5,7,13,14 – лінза; 4 – модулятор; 8,9,10,11,15 – зеркало; 16 – фотоприймач.

Модуляція світлового потоку різними частотами дозволяє здійснити наступне розділення сигналів. У вимірювальному каналі модульоване світло проходить через лінзу 5 та напівпрозору пластинку 6 і лінзою 7 формується в паралельний світловий потік, який проходить через запилений газ і, відбившись від дзеркала 8, розташованого на протилежній стороні газоходу, повертається тим же шляхом і потрапляє на фотоприймач 16. У

каналі порівняння світло проходить через лінзу 13, напівпрозору пластину 12 та дзеркала 11, 9 потрапляє на загальний фотоприймач 16.

Дзеркало 8 складається з трьох плоских дзеркал, розташованих у взаємно перпендикулярних площинах, так що після трьох відображень світло повертається по шляху, паралельно первісному.

Відповідно до структурної схеми вимірювача (рис.3.7) вихідні сигнали фотоприймача 1 подають на підсилювач 2, поділяють по частотах (блок 4), демодулюють (блок 5). Потім формують відношення сигналів обох каналів і логарифм цього відношення (блок 6), рівний оптичній щільності D вимірюваного пилогазового середовища.

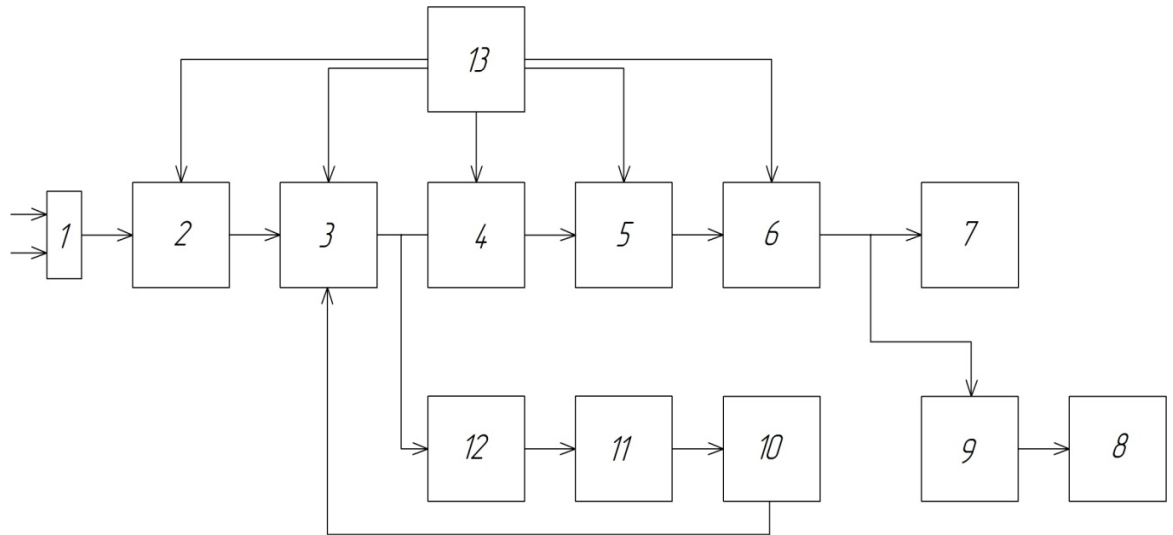


Рис. 3.7 – Структурна схема вимірювача: 1–фотоприймач; 2–підсилювач; 3,10–регулятор; 4,12–полосовий фільтр; 5,11–демодулятор; 6–логарифматор; 7–сигналізатор; 8–реєструючий пристрій; 9–нормуючий перетворювач, 13–джерело живлення.

Вихідний сигнал каналу порівняння виділяється фільтром 12, а потім надходить на демодулятор 11 і регулятор 10. Останній керує загальним посиленням сигналів у вимірювальному каналі і в каналі порівняння перед подачею їх на смугові фільтри, здійснюючи тим самим автоматичну компенсацію запилення захисних вікон коливань напруги живлення і т. д.

Крім того, в прилад введений сигналізатор 7, який автоматично відключає виробництво або частина його при перевищенні гранично

допустимих концентрацій пилю. Можлива реєстрація результатів вимірювань. Живлення приладу забезпечується від напруги 24 В, отриманої від батарейки. Загальний вигляд вимірювача зображено на рис. 3.8.

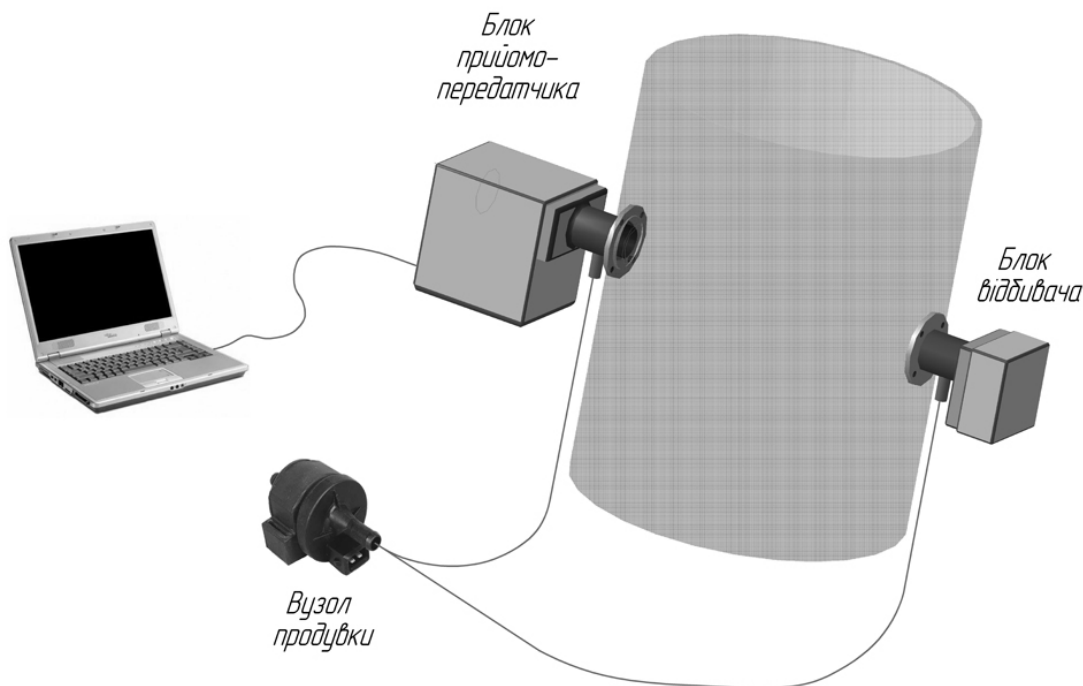


Рис. 3.8. Зовнішній вигляд та схема застосування аналізатору для контролю твердих часток у газових викидах промислових підприємств.

Передбачена періодична перевірка нульової точки приладу під час його експлуатації, для чого у вимірювальний канал перекривають доступ світлового потоку в газохід, і встановлюють нульове показання приладу.

3.3.1. Вибір спектральної області вимірювання

Газоаналізатор для вимірювання концентрації твердих часток у викидах промислових підприємств призначений для вимірювань в газових середовищах з високим вмістом водяних парів. Оптичне поглинання водяних парів може створювати похибки вимірювання. Тому важливо вибрати спектральну область, де таке поглинання буде порівняно малим. Такою областю являється видима область спектру з довжиною хвилі від 380 нм до 760 нм.

У якості джерела випромінювання вибрано світлодіод, що має ряд неодмінних переваг перед традиційними джерелами випромінювання з ниткою розжарювання. Це малі робочі струми; безінерційність; концентрація

поток в невеликому тілесному куті; вузький спектральний діапазон випромінювання. Використання таких випромінювачів дозволяє обходитися без традиційних світлофільтрів, зменшуючи при цьому світлові втрати.

Малі робочі струми, а також безінерційність світлодіодів дозволяють модулювати світловий потік з високою стабільною частотою і 100 %-ковою глибиною модуляції без використання традиційних механічних модуляторів.

В таблиці показані основні технічні характеристики ряду випромінюючих діодів великої яскравості, які випускає фірма «Kingbright». (табл. 3.6.).

Таблиця 3.5.

Порівняльна характеристики випромінюючих діодів великої яскравості фірми «Kingbright» (Німеччина).

Тип випромінюючого діода	L-53SEC-H	L7113SEC-H	L-76761CSEC-H
Сила світла, кд	10	10	4,5
Тілесний кут потоку, град.	30	20	20
Довжина хвилі максимуму, нм	630	640	640
Напівширина спектру випромінювання, нм	25	25	25
Діаметр лінзи, мм	5	5	3
Робочий струм, мА	30	30	30

Оскільки в приладі модуляція вимірювального макету для контролю дисперсних характеристик атмосферного повітря модуляція світлового потоку забезпечується імпульсним живленням світлодіода, а якість колімації потоку залежить від розміру джерела випромінювання, то був вибраний випромінюючий діод L-76761CSEC-H, що має найменші розміри і найбільшу яскравість в імпульсному режимі. Спектральний діапазон світлодіоду показано на рис. 3.9.

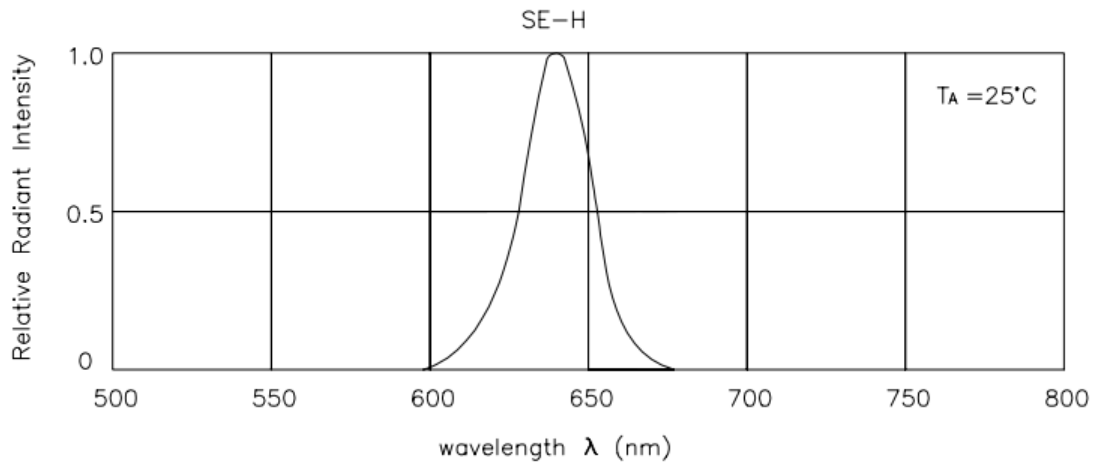


Рис. 3.9 – Характеристичний спектр світло діоду L-76761CSEC-H.

Даний світлодіод дозволяє забезпечити напрямлений світловий потік на відстані до 1 м від джерела.

3.3.2. Вибір фотоприймача

Для ефективної роботи приймальної частини вимірювача відповідно до заданого спектрального діапазону, було обрано фотоприймач ФР-117, що дозволило виключити погрішність обумовлену наявністю води і CO_2 в відведених газах (рис. 3.10).

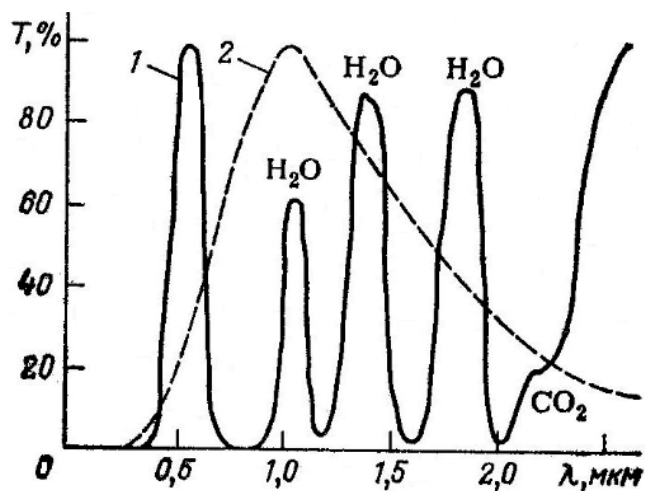


Рис. 3.10 – Спектральна характеристика фотопору з сірчастого кадмію (1), і спектри поглинання H_2O і CO_2 (2).

Максимум спектральної чутливості фотоприймача з сульфід кадмію, використовуваного в приладі, відповідає 0,5 мкм, максимум випромінювання джерела світла (випромінюючий діод L-76761CSEC-H) – 640 нм. На рисунку

3.10 представлені спектральні характеристики фотоприймача із сульфідом кадмію, спектри випромінювання світлодіода та спектри поглинання H_2O і CO_2 в атмосферному повітрі.

Як видно з рисунка 3.10, спектри поглинання води і CO_2 знаходяться в ближній інфрачервоній області спектра, тобто поза області чутливості фотоприймача. Крім того, максимальна чутливість фотоприймача (0,55 мкм) відповідає максимальному поглинанню світла для частинок пилу розміром 0,2–0,3 мкм. Звідси випливає, що застосування фотоприймача з сульфідом кадмію дозволяє також розширити інтервал розмірів вимірюваних часток пилу в бік дрібних частинок (0,2–0,3 мкм).

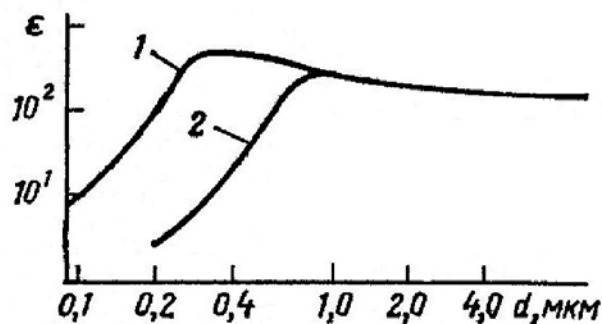


Рис.3.11 – Залежність коефіцієнта поглинання ϵ часток від їх діаметра d для $\lambda = 0,55$ мкм (1) і $\lambda = 0,64$ мкм (2).

При використанні фотоприймача, спектральна чутливість якого зміщена в бік інфрачервоної області спектра (наприклад, з максимумом чутливості при довжині хвилі, що дорівнює 0,64 мкм і відповідної максимуму спектру випромінювання світлодіода), будуть реєструватися лише ті частинки, діаметр яких більше 0,6 мкм.

3.3.3. Розрахунок оптичної схеми блоку випромінювача

Оскільки ставиться завдання вимірювати оптичну густину пилогазового середовища в товщині від 0,05 до 1 м, оптична система такого вимірювача повинна бути спроектована таким чином, щоб передавати світлову енергію від джерела випромінювання до фотоприймача на відстані до 1 м з найменшими втратами.

До складу такої системи повинен входити концентратор світлового потоку у вигляді коліматора, що трансформує світловий пучок, який розходить від випромінювача в паралельний пучок (рис. 3.10).

Якість колімації потоку залежить від співвідношення:

$$A = f' / l, \quad (3.1)$$

де f' – фокусна відстань об'єктива;

l – геометричний розмір джерела випромінювання.

Якщо задати $f'=180$ мм, то для $l = 3$ мм, $A = 180/3 = 60$ мм. Таке співвідношення забезпечує високу якість колімації за прийнятих габаритів схеми. Оскільки прилад працює у вузькому спектральному інтервалі, цілком достатньо застосувати в оптичній схемі однолінзовий об'єктив.

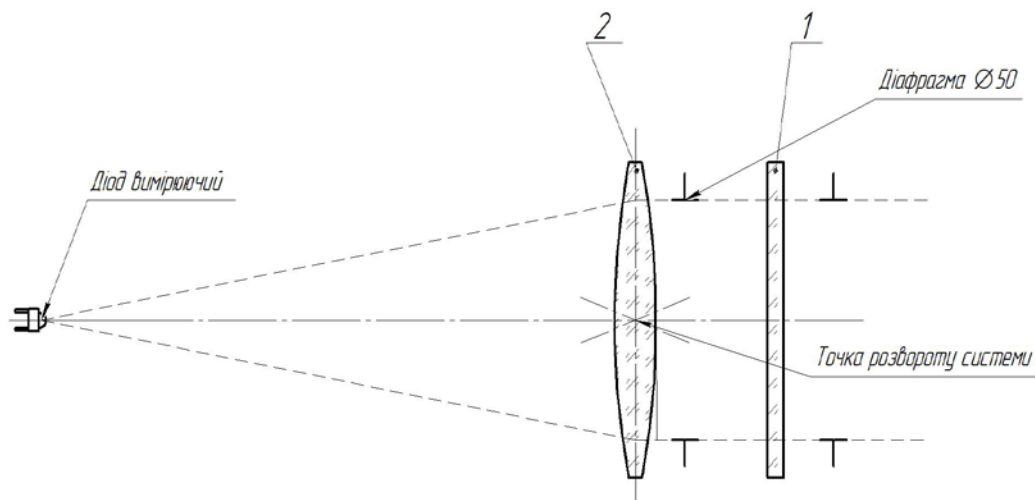


Рис.3.12 – Схема оптична функціональна блоку випромінювача: 1– лінза; 2–захисне скло

Для лінзи з $f'=180$ мм виберемо її світловий діаметр $D_{\text{св}}$. Для цього розрахуємо діаметр перерізу пучка випромінювання в передній головній площині лінзи за формулою:

$$2h = 2tg(\alpha/2) * f', \quad (3.2)$$

де h – радіус перерізу пучка;

α – тілесний кут світлового потоку.

Для $\alpha = 20^\circ$: $2h = 2 * 0,1763 * 180 \text{ мм} = 63 \text{ мм}$

Схематичне зображення світлорозсіяння в оптичній системі показано на рис. 3.13.

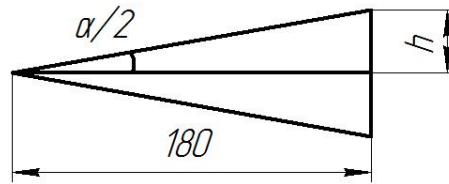


Рисунок 3.13 – Діаметр перерізу пучка

Задамо для об'єктива параметри:

- діаметр лінзи $D = 66$ мм;
- світловий діаметр $D_{св} = 60$ мм.

Виберемо двояковигнуту лінзу з рівними радіусами кривизни поверхонь $r_1 = -r_2$ (рис. 3.14).

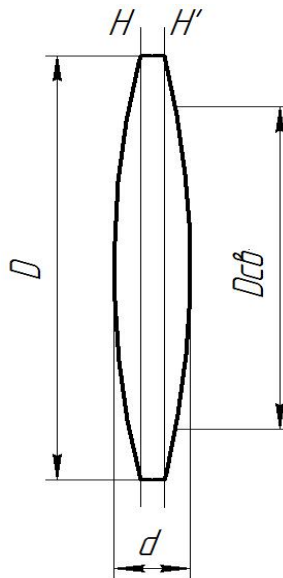


Рис. 3.14 – Двояковигнута лінза з рівними радіусами кривизни поверхонь $r_1 = -r_2$.

Така конфігурація забезпечує найменшу товщину лінзи. Для розрахунку радіусів кривизни скористаємось співвідношенням:

$$\frac{1}{f'} = (n - 1) * \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n_\lambda - 1)^2}{n_\lambda} * \frac{d}{r_1 * r_2}, \quad (3.3)$$

де n_λ – показник заломлення оптичного матеріалу лінзи для робочої довжини хвилі ви промінювання λ ; d – товщина лінзи по оптичній осі.

Якщо $r_1 = -r_2$, то співвідношення (1.4.3) має вигляд:

$$1/f' = (n - 1) * 2/r - (n_\lambda - 1)^2 / n_\lambda * d/r^2, \quad (3.4)$$

В якості матеріалу для оптичних деталей вибираємо безколірне оптичне скло К8.

Для нього в області $\lambda = 640$ нм $n_\lambda = 1,5143$ (ГОСТ 13659–78. Скло оптичне безколірне. Фізико–хімічні характеристики).

Помноживши обидві частини співвідношення (3.4) на r^2 , отримаємо:

$$r^2/f' = (n - 1) - 2r - (n_\lambda - 1)^2 * d/n_\lambda, \quad (3.5)$$

Задамо товщину лінзи по оптичній осі $d = 10$ мм. Підставивши в співвідношення (3.5) числові значення, отримаємо:

$$0,0055r^2 - 1,0286r + 1,7467 = 0$$

Обчислення квадратичного рівняння дає результат:

$$r_1 = -r_2 = 185,3 \text{ мм.}$$

Із ряду радіусів по ГОСТ 1807–75 вибираємо $r = 185,35$ мм.

Далі розрахуємо кривизну прогину a_1 по світловому діаметру лінзи $D_{св} = 60$ мм за формулою:

$$a_1 = r - l_1 \quad (3.6)$$

Таким чином кривизна лінзи буде мати вигляд (рис. 3.15)

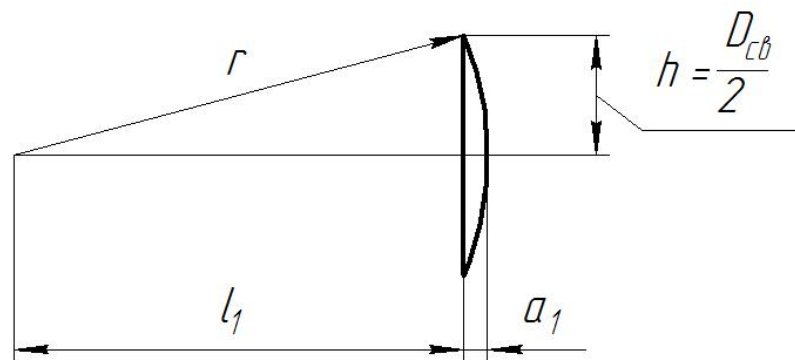


Рис. 3.15 – Стрілка прогину лінзи оптичної системи вимірювача.

З рисунка 3.15 видно, що

$$a_1 = r - \sqrt{r^2 - (D_{\text{св}}/2)^2} \quad (3.7)$$

Підставивши числові значення, отримаємо:

$$a_1 = 185,35 - \sqrt{34354,6 - 900} = 2,44 \text{ мкм}$$

Далі розрахуємо стрілку прогину по повному діаметру лінзи $D = 66 \text{ мм}$:

$$a_2 = r - l_2 = r - \sqrt{r^2 - (D_{\text{св}}/2)^2} = 2,96 \text{ мкм}$$

1) Розраховуємо товщину t по краю лінзи:

$$t = d - 2a_2 = 3,14 \text{ мм}$$

2) Розраховуємо вершинну фокусну відстань лінзи за формулою:

$$S_F = -f' \left[1 + (n-1)d/n * r_2 \right] \quad (3.8)$$

Підставивши числове значення, отримаємо: $S_F = -176,7 \text{ мм}$

Відповідно, оскільки $r_1 = -r_2$, то $S'_F = 176,7 \text{ мм}$

Конструкція вибраного випромінюючого діода містить збираючу сферичну лінзу. Врахувати вплив цієї лінзи, не знаючи її оптичних параметрів, при розрахунку оптичної схеми коліматора, досить важко. Тому в конструкції передбачено юстування положення випромінюючого діода шляхом його прямолінійного переміщення вздовж оптичної осі і розвороту навколо центра кристала випромінювача.

Далі врахуємо величини мінімального допустимого зазору кріплення оптичних деталей в металічних оправках.

При змінах температури в межах від 20°C до -30°C через різницю коефіцієнтів лінійного розширення цих матеріалів може виникнути затиснення деталі в оправі, що викличе її деформування.

В довідковій літературі [28, с. 483] приводяться табличні дані зміни зазору (Δ_t в мкм) в спряженнях деталей з різних матеріалів при зміні температури на 10°C для спряженого розміру 10 мм. Обчислення зміни

зазору Δ_t для спряженого розміру D при зміні температури на ΔT виконується за формулою:

$$\Delta_t(\Delta T, D) = \Delta_{\text{справочн.}} * D/10 * \Delta T/10 \quad (3.9)$$

Для пари «скло – дюралюміній» – $\Delta_{\text{справочн.}} = 1,8$ мкм

Обчислимо Δ_t для $D = 66$ мм і $\Delta T = -50^\circ\text{C}$ (відповідає зміні T від $+20^\circ\text{C}$ до -30°C).

Підставляючи числове значення, отримаємо:

$$\Delta_t = 1,8 * 6,6 * 5,0 = 59,4 \text{ мкм.}$$

Таким чином, ми можемо забезпечити залишок оптимального зазору між спряженими деталями для пари «скло–дюралюміній».

Складальне креслення блоку випромінювача наведено на рис. 3.16.

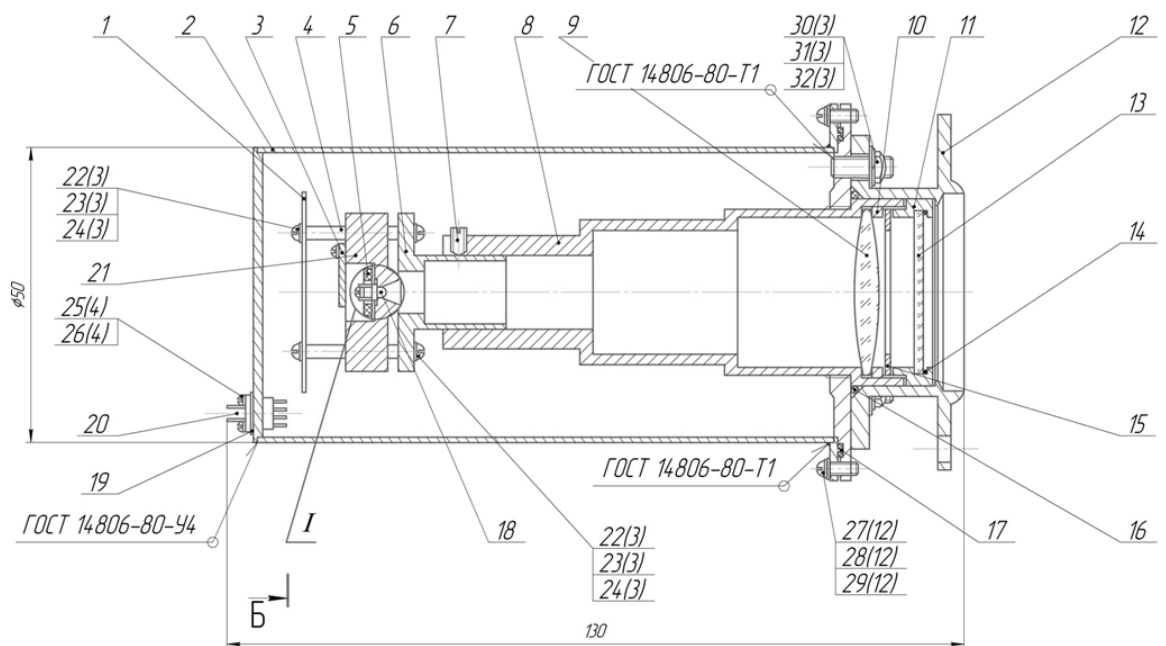


Рис. 3.16 – Складальне креслення блоку випромінювача вимірювача дисперсних часток у викидах промислових підприємств: 1 – плата випромінювача, 2 – кришка, 3 – планка, 4 – стойка, 4 – шайба, 6 – втулка, 7 – гвинт, 8 – тубус, 9 – лінза, 10 – кільце різьбове, 11 – оправа, 12 – гніздо, 13 – скло захистне, 14 – кільце дротяне, 15 – діафрагма, 16 – кільце, 17, 19 – прокладка, 18 – діод випромінюючий, 20 – вилка, 22-32 – кріпільні елементи конструкції.

Великі вібрації і рефракційний ефект флуктуацій густини газового потоку можуть викликати хаотичне переміщення світлового пучка в площині об'єктива фотоприймача. Якщо при цьому буде відбуватися часткове діафрагмування пучка оправою цього об'єктива, це буде викликати нерегулярну зміну сигналу з фотоприймача, збільшуючи тим самим випадкову похибку вимірювання.

Щоб мінімізувати цей фактор, діаметр світлового пучка обмежується до величини 50 мм діафрагмою, встановленою перед об'єктивом блоку випромінювача.

3.4. Розрахунок функції перетворення вимірювача

Основними вузлами піломірів є первинний і проміжний вимірювальні перетворювачі, вторинні вимірювальний, реєструючий і регулюючий прилади.

Первинний вимірювальний перетворювач в процесі вимірювання сприймає вимірювану величину у формі сигналу $x(t)$. Цей вхідний сигнал перетвориться первинним вимірювальним перетворювачем у вихідний сигнал $y(t)$. Слід мати на увазі, що на первинний вимірювальний перетворювач надходять також сигнали перешкод z стохастичної природи (тертя, шуми) і $z(t)$ за рахунок зміни впливають величин. Первинний перетворювач повинен вибрати сигнал, який є носієм вимірювальної інформації, а всі інші сигнали розглядати як заважають (помилкові). Ця задача досить складна і до цих пір технічно остаточно не вирішена.

Вторинні прилади призначені для вимірювання і реєстрації вихідного сигналу первинного перетворювача і видачі сигналів на апаратуру регулювання та сигналізації.

Відповідно до рекомендацій Міжнародної електротехнічної комісії, основними метрологічними характеристиками, що роблять вплив на результати і похибку вимірювання, є інтервал значень вимірюваної величини, вихідний сигнал, основна похибка, похибка взаємовпливу, відтворюваність і

дрейф нуля, рівень вихідного шуму, мінімальна обумовлена концентрація, час затримки показань, час прогріву приладу і час його безперервної роботи.

Характеристики пиломіра слід визначати з урахуванням умов експлуатації приладу: всередині приміщень (легкі умови експлуатації), в погано захищених приміщеннях (середні умови експлуатації) і поза приміщеннями (важкі умови експлуатації).

Максимальна інформаційна здатність приладу залежить від імовірнісного розподілу вимірюваної величини і конструкції приладу; остання може бути оптимізована так, щоб інформаційна здатність була максимальною.

Метрологічні характеристики пиломіра в основному визначаються характеристиками первинного вимірювального перетворювача. Тому при точній і безвідмовній роботі пиломіра вихідну величину можна розглядати як функцію:

$$y_0 = F(x, g_i), \quad (3.10)$$

де x – вхідна величина; g_i – внутрішні параметри первинного перетворювача.

Для реального первинного перетворювача вихідний сигнал $y \neq y_0$, оскільки вхідна величина x має деякі флуктуації Δx , а параметри отримують в процесі виготовлення і експлуатації приладу похибка Δg_i . Тому

$$y = F(x \pm \Delta x, g_i \pm \Delta g_i) \quad (3.11)$$

При цьому основна похибка перетворення складе:

$$\Delta y = y - y_0 \quad (3.12)$$

Якщо врахувати, що в більшості випадків Δx і Δg_i (малі, а первинний перетворювач можна вважати безінерційним, то відносна похибка первинного перетворювача може бути визначена наступним чином:

$$\gamma_{\text{пр}} = \sqrt{\left[\frac{x}{F(x, g_i)} * \frac{\partial F(x, g_i)}{\partial x} \right]^2 \gamma_x^2 + \sum \left[\frac{g_i}{F(x, g_i)} * \frac{\partial F(x, g_i)}{\partial g_i} \right]^2 \gamma_i^2 + \gamma_{\text{п}}^2}, \quad (3.13)$$

де $\gamma_{\text{пр}}$ – відносна похибка первинного перетворювача;

γ_x – відносна зміна вхідної величини;

$\frac{g_i}{F(x, g_i)}$ – «питома вага» параметра g_i ;

$\frac{\partial F(x, g_i)}{\partial g_i}$ – «швидкість приросту» вихідного сигналу при зміні параметра g_i ;

γ_i – відносна похибка g_i параметра; γ_{Π} – похибка, обумовлена перешкодами.

Можливість забезпечення заданих характеристик приладу визначається виразом:

$$I/\sqrt{P\eta\tau},$$

де I – інформаційна здатність приладу; P – потужність вхідного впливу на первинний перетворювач; τ – швидкодія приладу; η – інформаційно-енергетичний к. к. д. первинного перетворювача.

Необхідною умовою забезпечення заданих технічних характеристик приладу є:

$$I/\sqrt{P\eta\tau} \leq \sqrt{\tau/\tau_{\text{пр}}}/(e\gamma_{\text{пр}}\sqrt{W}) \quad (3.14)$$

де $\tau_{\text{пр}}$ – швидкодія первинного перетворювача; W – енергія термодинамічних флуктуацій; e – основа натуральних логарифмів.

Перетворивши нерівність (3.14) і підставивши в нього значення $\gamma_{\text{пр}}$ з рівняння (3.13), отримаємо:

$$\sum \left[\frac{g_i}{F(x, g_i)} * \frac{\partial F(x, g_i)}{\partial g_i} \right]^2 \gamma_i^2 \leq \frac{A}{e^2 W^2} * \frac{\tau}{\tau_{\text{пр}}} - \left[\frac{x}{F(x, g_i)} * \frac{\partial F(x, g_i)}{\partial x} \right]^2 \gamma_x^2 - \gamma_{\Pi}^2, \quad (3.15)$$

де $A = P\eta\tau/W$ – перевищення потужності вхідного впливу над потужністю термодинамічних флуктуацій.

Дотримання нерівності (3.15) свідчить про принципову можливість поліпшення технічних характеристик, так як конструктивно – технологічні $\{g_i \partial F(x, g_i) \gamma_i / [F(x, g_i) \partial g_i]\}$, експлуатаційні (γ_n, γ_x) та фізико – енергетичні ($A, \tau_{\text{пр}}$) можливості первинного перетворювача використані не повністю. В іншому випадку технічні вимоги, які пред'являються до приладу, не можна задовольнити без поліпшення конструктивно – технологічних або фізико –

енергетичних параметрів первинного перетворювача. Рівність лівої і правої частин співвідношення (3.15) означає, що всі потенційні можливості первинного перетворювача використані і поліпшення будь – якої характеристики веде до погіршення інших або за рахунок поліпшення одного з параметрів: $A, \tau_{\text{пр}}, \gamma_n, \gamma_x, \gamma_i$.

У реальних умовах необхідно, щоб права частина (3.15) була більше лівої, так як при рівності випадкове збільшення будь – якого із значень $\gamma_n, \gamma_x, \gamma_i$ призведе до того, що ліва частина стане більше правої та забезпечення необхідних характеристик буде принципово неможливо, тобто покази приладу стануть недостовірними. Назвемо запасом достовірності Δ вираз:

$$\Delta = \sqrt{A\tau/\tau_{\text{пр}} / (eI - \gamma_{\text{пр}})} \quad (3.16)$$

Для нормального функціонування приладу параметри первинного перетворювача повинні бути такими, щоб узагальнена міра технічних та експлуатаційних характеристик приладу складала $\Delta/\sigma_{\Delta} = 2 \div 3,5$ (де σ_{Δ} – середнє квадратичне відхилення запасу достовірності Δ).

Величина σ_{Δ} обумовлена флуктуаціями $\gamma_n, \gamma_x, \gamma_i$, а також раптовими відмовами, що приводять до зміни зазначених параметрів). З цієї умови випливає, що нескінченне зменшення швидкодії не забезпечує повного використання потенційних можливостей первинного перетворювача.

Кількісна оцінка ефективності перетворення в первинному перетворювачі може бути визначена за допомогою наступних параметрів:

а) ефективної чутливості

$$s = \Delta y/y_n / \Delta x/x_n, \quad (3.17)$$

де y_n і x_n – нормовані значення вихідного і вхідного сигналів первинного перетворювача;

Δx і Δy – зміна вхідного і вихідного сигналів.

б) порогу чутливості

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_x \sqrt{2\pi\tau_{\text{пр}}} \quad (3.18)$$

де ε_x – мінімальне збільшення вимірюваної величини від нульового значення, що викликає приріст вихідного сигналу, за абсолютним значенням, рівне середньому квадратичному відхиленню його флуктуацій.

3.5. Метрологічне забезпечення вимірювань

Основною метрологічною задачею усіх вимірювань є збереження і підтримка єдності і точності вимірів. Вона вирішується передачею одиниці виміру від еталона, або еталонної установки, що відтворює цю одиницю вимірів, робочому вимірювальному приладу. Ця передача здійснюється звіренням показань робочого приладу і зразкового та на якомусь етапі зразкового приладу з робочим еталоном. Система звірення побудована так, що зразкові засоби звіряються в метрологічних інститутах, а в останній ланці, тобто робочий прилад зі зразковим, – перевірочних лабораторіях.

Дана система визначена перевірочними схемами, що існують для різних видів вимірювань. Вони визначають порядок звірень, систему субпідрядності вимірювальних засобів від еталона до робочого приладу і співвідношення точності, що враховують неминучу втрату в точності при кожному звірненні.

Вимірювання концентрації пилу є важким метрологічним завданням. Це обумовлене тим, що пил являє собою складну систему, яку, на противагу газоподібному середовищу, не можна описати в достатньому ступені одним або двома параметрами. Насамперед, пил майже завжди є полідисперсною, тобто характеризується більш–менш широким спектром розмірів часток (від 10^{-2} до 10^2 мкм). Інтервал концентрацій являється ще більш широким (від 10^{-8} до 10^5 мг/м³). (Крім того, форма й фізико–хімічні властивості часток пилу можуть бути найрізноманітнішими. Слід урахувати й часову зміну властивостей пилу.[1])

Усе це виключає можливість створення універсального методу вимірювання концентрації пилу. Відомі в цей час аналітичні методи можна

використовувати для кількісного контролю пилу тільки в якомусь, у більшості випадків, досить вузькому інтервалі концентрацій. При цьому точність вимірювання залежить від фізико – хімічних властивостей часток пилу й умов експлуатації приладу. На відміну від газоаналізаторів, які засновані як на хімічних, так і на фізичних методах, у пиломірах застосовують тільки фізичні методи.

Пилогазове середовище є нестійкою аеродисперсною системою. Це вносить суттєві труднощі при створенні пилових еталонів. Певні труднощі виникають при вимірюванні пилу в газоходах, оскільки в цьому випадку необхідно враховувати вплив природної турбулентності пилогазового потоку.

Якщо зміни концентрації пилу, викликані турбулентними флуктуаціями в зоні вимірювання, позначити через $\gamma_{\text{фл}}$, а похибка вимірювання через $\gamma_{\text{п}}$, то сумарна зміна концентрації $\Sigma \gamma$ буде дорівнювати:

$$\Sigma \gamma = \sqrt{\gamma_{\text{фл}}^2 + \gamma_{\text{п}}^2} \quad (3.19)$$

Різниця між $\Sigma \gamma$ і $\gamma_{\text{фл}}$ звичайно мала. Тому розсіювання вимірюваних величин і, отже, похибка вимірювання в першу чергу обумовлені турбулентними флуктуаціями. З рівняння (3.19) випливає висновок, досить істотний для оцінки даних пилового контролю, а саме: тому що $\gamma_{\text{фл}}$ велике в порівнянні з $\gamma_{\text{п}}$, то немає необхідності домагатися високої точності вимірювання. Але не можна й зневажати вірогідністю вимірювальних приладів, тобто при аналізі концентрації пилу в газоходах необхідно дотримання умови $\gamma_{\text{п}} < \gamma_{\text{фл}}$. Якщо $\gamma_{\text{п}} > \gamma_{\text{фл}}$, то виявити зміни концентрації пилу не можна. Наприклад, при $\gamma_{\text{п}} = 0,3\gamma_{\text{фл}}$ $\Sigma \gamma = \sqrt{\gamma_{\text{фл}}^2 + \gamma_{\text{п}}^2} = \gamma_{\text{фл}}\sqrt{1 + (0,3)^2} = 1,04\gamma_{\text{фл}}$. Таким чином, між $\Sigma \gamma$ і $\gamma_{\text{фл}}$ складе тільки 4% (практично прийнятною вважається похибка приладу $\pm 10\%$).

3.6. Визначення похибки пиломіру

Точність пиломіра визначається ступенем збігу дійсних характеристик перетворення, обумовлених умовами експлуатації неробочими режимами приладу, з відповідними номінальними характеристиками перетворення. Різницею між дійсними й номінальними характеристиками перетворення є похибкою пиломіра. Вона обумовлена наступними факторами: властивостями пилу (основна похибка); впливом зовнішніх величин, що впливають на пил, і неінформативними параметрами вхідного сигналу (додаткова похибка); відмінністю частотних спектрів вхідного сигналу від номінальної частоти, для якої прийняті номінальні характеристики перетворення, (динамічна похибка).

Результуюча похибка пиломіра може бути визначена розрахунковим, експериментальним і комбінованим методами. Оскільки методи розрахунків похибок завжди приблизні, перевагу віддають експериментальному методу. Для реалізації його необхідно мати методику дослідження; устаткування, що дозволяє відтворювати реальні умови й режим роботи пиломіра; зразкову апаратуру, за допомогою якої можна вимірювати з необхідною точністю вхідні й вихідні сигнали експлуатованих приладів.

При атестації пиломір повинен перебувати в умовах, ідентичних робочим. Слід урахувати, що похибка пиломіра випадково змінюється в часі, тому характеристики похибки в ході експлуатації й у момент атестації можуть бути різними.

До характеристик похибок, як функціям інформативного параметра вхідного сигналу відносяться: межа систематичної допустимої складової похибки, її математичне очікування й середнє квадратичне відхилення, межа допустимого середнього квадратичного відхилення випадкової складової, межа допустимої сумарної похибки.

Для оцінки динамічних похибок вводять поняття граничної частоти $f_{гр}$, визначається як найвища частота вимірюваного синусоїдального сигналу, при якій середнє квадратичне відхилення рівне 10%. Замість $f_{гр}$ часто

вказують час установлення показань (час перехідного процесу) τ , яке визначається як час, необхідний для досягнення кінцевого показання з погрішністю $\pm 5\%$ при стрибкоподібній зміні вимірюваного вхідного сигналу $x(t)$; Величини $f_{\text{гр}}$ і τ зв'язані відомим співвідношенням:

$$f_{\text{гр}} = 1/(2\tau) \quad (3.20)$$

Для градування пиломіра й оцінки його похибки вимірювання проводять одночасні виміри концентрації пилу випробуваним пиломіром і контрольним методом і отримані результати вимірювання зіставляють. У якості контрольного методу найбільш часто використовують ваговий метод, заснований на вимірюванні пилу, осілої з потоку на фільтр. Хоча цей метод і має досить високу похибку вимірювання, однак він забезпечує сталість похибки вимірювання для всього інтервалу вимірюваних часток пилу. (ГОСТ 24104 – 88)

Якщо припустити, що всі складові похибки адитивні й взаємонезалежні, то сумарна абсолютна середня квадратична похибка ΔC визначення концентрації пилу ваговим методом може бути представлена наступним виразом:

$$\Delta C = \left[\left(\frac{\partial C}{\partial m} \right)^2 \Delta m^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial m_0} \right)^2 \Delta m_0^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial V} \right)^2 \Delta V^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)^2 \Delta t^2 \right]^{1/2} \quad (3.21)$$

де $\Delta m_0, \Delta m, \Delta V, \Delta t$ – абсолютні погрішності визначення маси чистого фільтра, фільтра із пробой пилу, об'ємної швидкості й часу відбору проби пилу відповідно.

Похідні, що входять в (3.20) мають наступні значення:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial m} &= \frac{\partial C}{\partial m_0} = \frac{1}{Vt}; \\ \frac{\partial C}{\partial V} &= -\frac{m - m_0}{tV^2}; \\ \frac{\partial C}{\partial t} &= -m - m_0/(Vt^2) \end{aligned}$$

Підставивши значення похідних у вираз, після відповідних перетворень одержимо рівняння для визначення абсолютної ΔC і відносної $\Delta C/C$ похибок залежно від похибок визначення складових;

$$\Delta C = \pm [\Delta m^2 + \Delta m_0^2 + (m - m_0)^2 (\Delta V^2/V^2 + \Delta t^2/t^2)]^{1/2} / Vt \quad (3.22)$$

$$\Delta C/C = [\Delta m^2 + \Delta m_0^2 + (m - m_0)^2 (\Delta V^2/V^2 + \Delta t^2/t^2)]^{1/2} / (m - m_0) \quad (3.23)$$

З рівняння (3.23) випливає, що для збільшення точності визначення концентрації пилу ваговим методом потрібно не тільки підвищувати точність вимірювання вихідних величин (m , m_0 , V , t), але й забезпечити певну масу $(m - m_0)$ відібраному пилу. При $(m - m_0) = 1,2$ мг похибка вимірювання концентрації пилу становить $\pm 20\%$.

3.7. Методики проведення повірки пиломіра

Для проведення градуювання пиломіра використовують установку (рисунок 3.17), яка повинна включати генератор пилу, пилову камеру, вентилятор і зонд для відбору проби пилу на фільтр при контролі ваговим методом.

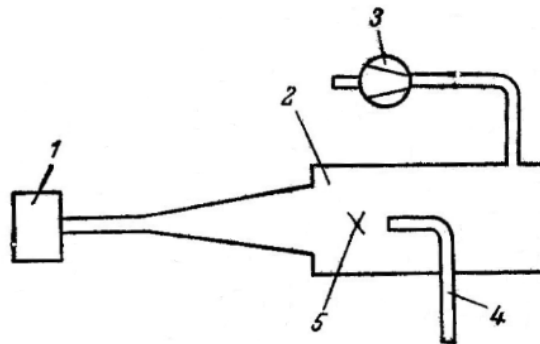


Рис. 3.17 – Структурна схема установки для градуювання пиломірів:

1 – генератор пилу; 2 – пилова камера; 3 – вентилятор; 4 – пробовідбірний зонд; 5 – місце установки первинного вимірювального перетворювача пиломіра.

Первинний вимірювальний перетворювач випробуваного пиломіра встановлюють у пиловій камері. Місце установки його вибирають таким чином, щоб пробовідбірний зонд знаходився на невеликій відстані від нього на одній лінії потоку. Тільки при дотриманні цієї умови значення концентрації пилу, вимірювані ваговим методом і випробуваним пиломіром, будуть рівні між собою.

За допомогою генератора в пиловій камері створюються різні концентрації пилу, відповідні до інтервалу вимірюваних пиломіром концентрацій. Точність дозування пилу повинна бути досить високою, а концентрація її в камері при режимі, що встановився, стабільна в часі. Однак виконати, другу умову доволі важко через безперервне осадження зважених часток пилу і їх агрегації.

У пилогазових потоках, що генеруються, спостерігаються значні короточасні флуктуації концентрації пилу. Тому результати вимірювання слід усереднювати за певний інтервал часу. Значення основної абсолютної погрішності ΔC і основної приведенної погрішності γ випробуваного приладу в кожній точці перевірки розраховують по формулах:

$$\Delta C = C_B - C_D \quad (3.23)$$

$$\gamma = \Delta C * 100 / (C_K - C_H) \quad (3.24)$$

де C_B – виміряне значення концентрації пилу в точці перевірки показаннями по показам від градуйованого приладу;

C_D – дійсне значення концентрації пилу в точці перевірки, виміряне ваговим методом;

C_K і C_H – верхній і нижній межі вимірювання приладу.

Для градуювання і оцінки похибок пиломірів рекомендується використовувати як конкретний пил, так і суміші, що складаються із декількох видів пилу, для контролю яких призначений пиломір. Це обумовлене тим, що показання більшості пиломірів суттєво залежить від хімічного й дисперсного складу пилу, форми часток. Для того самого пиломіра можна визначити декілька градуювальних кривих, відповідних до різних видів пилу.

Для градуювання пиломірів використовують також еталони пилу. Таке градуювання дозволяє визначити показання пиломіра для «ідеального» пилу й потім оцінити вплив зміни властивостей пилу (форми й розміру часток, їх хімічного складу) на його показання. Таке градуювання становить інтерес при дослідженні методів пилового контролю. У якості еталонів пилу

використовуються монодисперсні сферичні частки (природні й штучні). Такими частками є полістирольний латекс, що складається зі сферичних часток розмірами від 0,1 до 3 мкм, пилок із частками 12, 20, 50 і 90 мкм, скляні кульки різних розмірів і ін.

Використання установки для приготування сумішей відбувається лише при розробці приладу та при випуску з виробництва, в зв'язку зі складністю проведення експерименту. Для сучасних оптичних приладів перевірка проводиться за допомогою світлофільтрів. Характеристики світлофільтрів установлюються при градуюванні приладу.

Комплект світлофільтрів КС–105 призначений для перевірки фотометричних шкал і шкали довжин хвиль оптичних приладів, що працюють в ультрафіолетовій, видимій і близькій інфрачервоній області спектра.

Комплект світлофільтрів складається із чотирьох нейтральних світлофільтрів із кварцового скла з напиленим металевим шаром, що мають коефіцієнти пропускання від 2 до 92% у спектральному діапазоні від 200 до 2500 нм; чотирьох світлофільтрів зі скла НС8, що мають коефіцієнти пропускання від 2 до 60% у спектральному діапазоні від 400 до 750 нм; світлофільтра зі скла ПС7, що має смуги поглинання у спектральному діапазоні від 400 до 750 нм і світлофільтра зі скла ТОСП, що має смуги поглинання в діапазоні від 1000 до 2500 нм. Перевірка проводиться в двох точках діапазону вимірювання: $(30\%...40\%)C_B$ та $(60\%...70\%)C_B$.

Висновки до розділу 3

Проаналізовано оптичні схеми існуючих оптичних пиломірів: однопроменеві та двопроменеві. Однопроменеві оптичні схеми більш прості, мають ряд похибок, зумовлені нестабільністю напруги живлення, а також старінням джерела світла і фотоприймача. Двопроменеві оптичні пиломіри компенсаційного типу характеризуються досить складною оптичною схемою в порівнянні з приладами некомбінаційного типу. У двопроменевих оптичних схемах похибка вимірювання, викликана нестабільністю напруги

живлення і старінням елементів значно менша, також вони характеризуються більш високою стабільністю нульової точки.

Для контролю твердих часток у викидах промислових підприємств пропонується до застосування оптичний метод у видимому спектральному діапазоні випромінювання, однопроменева оптична система вимірювача з подальшим розділенням на два світлові потоки – вимірювальний та порівнювальний. Апробований вимірювальний засіб містить спеціальний блок випромінювача, фотоприймач з сульфїду кадмію, світлодіод, модулятор, автоматична компенсація запилення захисних вікон.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ІНФОРМАЦІЙНА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ КОНТРОЛЮ ТВЕРДИХ ЧАСТОК У ГАЗОВИХ ВИКИДАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ»

Розглянувши в попередніх розділах вплив твердих часток у газових викидах промислових підприємств й шляхи вирішення. В цьому розділі буде проведено аналіз стартап проекту: « Інформаційна вимірювальна технологія контролю твердих часток у газових викидах промислових підприємств»

4.1 Опис ідеї проекту

Ідея проекту полягає в контролі часток в газових викидах промислових підприємств., що уточнено та наведено в таблиці 4.1.

У таблиці 4.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 4.1.

Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка приладу контролю твердих часток у газових викидах промислових підприємств	Контролю твердих часток атмосферного повітря з підвищеною точністю й чутливістю вимірювань	Забезпечення більшої точності виміру
	Пропонована методика та інструментальне забезпечення проведення вимірів не потребує попередньої пробо підготовки зразків атмосферного повітря та відповідає умовам експрес вимірювань.	Зручність у використанні
	Винахід відноситься до вимірювальної техніки, призначений для визначення концентрації пилу і може бути використано для контролю забрудненості довкілля і в інших галузях техніки	Багато функціональний прилад

Отже, пропонується новий спосіб інформаційно вимірювальної технології контролю твердих часток у газових викидах промислових підприємств. Винахід відноситься до вимірювальної техніки і може бути використано для контролю за вмістом сажистих часток в димових газах промислових топок у вугільній, хімічній, металургійній промисловості, а також в енергетиці.

Таблиця 4.2.

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій про-ект	Конкурент 1 Gravimat SHC500	Конкурент 2 Dusthunter T200	Конкурент 3 FWE 200			
1.	Вартість приладу, грн	185000	303400	286700	312690	-	-	+
2.	Швидкість встановлення	5	14	21	15	-	-	+
3.	Вартість обслуговування	2500	7500	9500	8000	-	-	+
4.	Відсоток браку	2	1	2	1	-	+	-
5.	Затрати на виробництво	Середні	Середні	Низькі	Середні	-	+	-
6.	Відносини з органами державної влади	Нейтральні	Добрі	Нейтральні	Нейтральні	-	+	-
7.	Торгова марка	Немає	Є	Є	Є	+	-	-

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

— визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;

— визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників

для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

– проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (результати аналіз наведено в табл. 4.2).

Порівнявши свій проект з конкурентами був визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару що є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту.

Вимірювання концентрації пилу є важким метрологічним завданням. Це обумовлене тим, що пил являє собою складну систему, яку, на противагу газоподібному середовищу, не можна описати в достатньому ступені одним або двома параметрами.

Насамперед, пил майже завжди є полідисперсною системою, тобто характеризується більш менш широким спектром розмірів часток (від 10^{-2} до 10^2 мкм). Інтервал концентрацій являється ще більш широким (від 10^{-8} до 10^5 мг/м³). (Крім того, форма й фізико-хімічні властивості часток пилу можуть бути найрізноманітнішими. Слід урахувати й часову зміну властивостей пилу.[1]

Проаналізувавши таблицю можна зробити висновок що наш проект розробка приладу контролю твердих часток у газових викидах промислових підприємств міг би бути виконаний багатьма методами, але серед доступних було обрано метод оптичний у видимому спектральному діапазоні випромінювання, даний метод допоможе реалізувати ідею.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 4.3.

Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність техно-логій
1.	Розробка приладу контролю твердих часток у газових викидах промислових підприємств	Розробка приладу для контролю твердих часток у викидах промислових підприємств із застосуванням оптичного методу у видимому спектральному діапазоні випромінювання, однопроменева оптична система вимірювача з подальшим розділенням на два світлові потоки – вимірювальний та порівнювальний.	У відкритому доступі	Доступний
2.		Розробка приладу для контролю твердих часток у викидах промислових підприємств із застосуванням радіоізотопного методу контролю концентрації пилу заснований на використанні властивостей радіоактивного випромінювання, яке поглинається частинками пилу.	У відкритому доступі	Доступний
3.		Розробка приладу для контролю твердих часток у викидах промислових підприємств із застосуванням фотометричного методу вимірювання заснований на попередньому осадженні часток пилу на фільтрі й визначенні оптичної щільності пилового осаду.	У відкритому доступі	Доступний
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Розробка приладу для контролю твердих часток у викидах промислових підприємств пропонується до застосування оптичний метод у видимому спектральному діапазоні випромінювання, однопроменева оптична система вимірювача з подальшим розділенням на два світлові потоки – вимірювальний та порівнювальний.				

На сьогоднішній день існує багато методів та засобів вимірювання концентрації твердих часток. В роботі [6] описано оптичний метод для безперервного автоматичного контролю концентрації пилу як в атмосфері, так і у димових газах промислових підприємств без попереднього відбору. За допомогою цього метода можна реалізувати ідею стартап проекту.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації. Це дозволяє спрямувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 4.4).

Таблиця 4.1.

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	9250000 (5x185000)
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Патентування продукту, велика конкуренція, висока ціна сертифікації виробу
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ДСТУ 2603-94 ГОСТ 17.2.3.02-2014
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	86,4%

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 4.5).

Після надходження до продажу у покупців можуть виникнути певні технічні проблеми, для своєчасного їх вирішення необхідна кваліфікована група технічної підтримки, якісний шлях доставки товару до покупця та спеціалісти в роботі з даним пристроєм. В подальшому планується формування системи обслуговування покупців вимірювача із залученням сторонніх сервісних організацій на договірній основі.

Таблиця 4.2.

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Швидкодія, точність експертизи твердих часток у газових викидах промислових підприємств.	Використано для контролю за вмістом сажистих часток в димових газах промислових топків у вугільній, хімічній, металургійній промисловості, а також в енергетиці	Особисті технічні стандарти встановленні на підприємствах. Державні стандарти оцінки контролю твердих часток у газових викидах промислових підприємств. Технічна підтримка на певний період з можливістю продовжити.	- до продукції Зручні габарити пристрою. Надійне програмне забезпечення. Точність вимірів пристрою. Тривалий термін експлуатації. Здатність до проведення експрес аналізу

У процесі реалізації проекту контролю мілко дисперсних часток у викидах промислових підприємств, у зв'язку із зміною економічної ситуації у галузі та на в країні в цілому – можуть виникнути загрози, що зменшать вірогідність реалізації проекту або взагалі унеможливлять його реалізацію. Можливі загрози при реалізації даної технології показано в таблиці 4.6.

Таблиця 4.3.

Фактори загроз реалізації проекту

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Удосконалення зарубіжних приладів, вихід на ринок нових	Аналіз конкурентів з вдосконаленням власного приладу
2.	Інфляція	Зміна курсу валюти	Продаж пристрою в іноземній валюті
3.	Постачання	Зменшення потенційних покупців	Зміна політики розовсюдження продукту
4.	Технічний	Збій в роботі пристрою	Створення кваліфікованої групи технічної підтримки та надання інструкції по експлуатації при придбанні товару.
5.	Наявність локального конфлікту та сході	Зменшення актуальності в покупців	Реалізація пристрою на іноземному ринку

Наявність відповідних загроз нашому пристрою зможе позитивно вплинути на наш технічний потенціал і змусить бути в курсі нових розробок у галузі ринку.

Але поряд із колом загроз існують і певні можливості (табл. 4.7).

Таблиця 4.4.

Фактори можливостей реалізації проекту.

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Науково - технічний	Нові відкриття в технології виготовлення та контролю.	Покращення якості пристрою, зменшення його собівартості
2.	Попит	Збільшення попиту на товар.	Підвищення кількості продажів а відповідно і прибутку.
3.	Економічні	Політика протекціонізму; підтримка інноваційного виробництва.	Зміна податкового тиску
4.	Політико правові	Може вплинути на купівлю/продаж товару.	Знаходження нових напрямків реалізації за кордоном.
5.	Екологія	Підвищення кількості людей зацікавлених в якості олійних товарів	Розповсюдження реклами на свій пристрій що допоможе знайти нових клієнтів.

Окрім певних загроз, ми маємо ряд переваг та можливостей. Проаналізувавши загрози було проведено ступеневий аналіз конкуренції на ринку. За отриманими даними проаналізовано особливості конкурентного середовища в якому буде реалізовуватися наш проект. Проведено огляд ситуації на ринку з метою виявлення монополістів що реалізують вироби подібно функціоналу та призначення (табл. 4.8).

Таблиця 4.5.

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Тип конкуренції	Олігополія	Ведення переговорів з іншими олігополістами для отримання взаємної вигоди
Рівень конкурентної боротьби	Національний	Покращення пристрою та пошук шляхів на міжнародний ринок
За галузевою ознакою	Міжгалузева	Розширення ринку за рахунок збільшення попиту
Конкуренція за видом товарів	Товарно-видова	Вдосконалення та реклама для показу переваг

За характером конкурентних переваг	Нецінова	Вдосконалення свого продукту і при цьому невелике зменшення цін відносно конкурентів
За інтенсивністю	Не марочна	Розробка бренду і його активна реклама

Розроблюваний продукт має тип конкуренції олігархія що дозволяє отримати взаємовигоду, рівень конкуренції є національний, товарно видова конкуренція. Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі.

Таблиця 4.6.

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	На ринку існує 3 прямі конкуренти, що виготовляють дане обладнання	Потенційними конкурентами є іноземні компанії які згодом можуть вийти на наш ринок. Патенти на продукти. Законодавчі обмеження. Гнучкі ціни.	Постачальниками є компетентні інтернет магазини. Диференціація витрат. Концентрація постачальників в значення розміру поставок	Основними клієнтами є установи та підприємства. Система інформації. Прибутки. Контроль якості.	Позиції компанії в даному випадку суттєві адже подібні за характеристиками аналоги практично відсутні
Висновки:	Слідкувати за пропозиціями конкурентів, та працювати над зменшенням витрат на виробництво.	Висока вірогідність появи нових гравців на ринку адже вхідні бар'єри є не дуже високими. Потенційних конкурентів немає	Наявність високої кількості постачальників не дає їм змогу контролювати умови роботи на ринку.	Розробка нових пропозицій для клієнтів та зменшення ціни дозволить задовільнити потреби покупців.	Зайняти стабільну позицію на ринку та конкуренти у перевагу, розроблювали нові види товарів

Після завершення аналізу факторів робимо прогноз щодо конкурентоспроможності. Точна оцінка конкурентоспроможності можлива лише після впровадження приладу, тому робимо лише попередню оцінку конкурентоспроможності.

Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 4.7.

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Ціна	Своєчасний зворотній зв'язок з клієнтами дасть змогу підвищити кредит довіри до компанії що призведе до підвищення попиту та в подальшому дасть змогу змінювати цінову політику.
2	Велика кількість постачальників	Супровід товару від покупки й подальшій експлуатації.
3	Висока якість	Висока якість і точність приладу, яка дозволяє клієнту отримувати максимально точний результат вимірювань.
4	Технічна підтримка	Присутність кваліфікованих технічних спеціалістів дозволить своєчасно вирішувати труднощі під час роботи пристрою.
5.	Наявність патентів	Наявність патенту на приладу, це дає споживачу упевненість в тому що він купує сертифікований продукт

Таблиця 4.8.

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «DUST_METER»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з METER Kompany						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Наявність патентів	16	+						
2	Велика кількість постачальників	15				+			
3	Висока якість	17	+						
4	Технічна підтримка	19	+						
5.	Ціна	14	+					+	

З таблиць 4.10 та 4.11 бачимо, що фактори конкурентоспроможності суттєві та мають великий позитивний внесок при впровадженні нового програмного забезпечення для розрахунку концентрації пилу.

Основною перевагою та головним досягненням є висока якість продукту та технічна підтримка на протязі всього терміну його використання споживачем.

SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Швидкість встановлення Вартість обслуговування Технічна підтримка Висока якість Новітні технології Екологія Попит	Слабкі сторони: Вартість приладу Затрати на виробництво Торгова марка Велика кількість постачальників Інфляція Політично правові Економічні
Можливості: 1. Збільшення продаж; 2. Отримання державних замовлень на отримання послуг; 3. Розширення ринку за рахунок іноземних замовників; 4. Зменшення податкового тиску, отримання тендерів на послуги. 5. Збільшення потенційних клієнтів через технічну підтримку.	Загрози: 1. Цінова конкуренція в зв'язку з появою нових гравців на ринку. 2. Різка зміна курсу гривні може привести до зменшення попиту, особливо з боку малих фірм. 3. Політичні та економічні ризики ведення бізнесу; 4. Зменшення продажів через несвоєчасне виконання замовлень.

На основі SWOT-аналізу (табл. 4.12) розробляємо альтернативи ринкової для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів таблиця 4.12.

Таблиця 4.10.

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Висока	1 рік
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Висока	1 рік
3	Стратегія виходу з ринку	Низька	1 рік

З зазначених альтернатив (табл. 4.13) обираємо стратегію компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями. Розроблена

система володіє потенційними можливостями для закріплення на ринку промислових вимірювачів викидів підприємств.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 4.11.

Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Промислові компанії	Середня	Залежить від рівня та темпу економічного розвитку в цілому та розвитку контролю	Середня	Середній бар'єр потрапляння на ринок
2.	Державні лабораторії контролю за якістю.			Середня	Середній бар'єр потрапляння на ринок
3.	Провідні інститути		твердих часток у газових викидах промислових підприємств	Середня	Середній бар'єр потрапляння на ринок
Які цільові групи обрано: Під час аналізу потенційних груп споживачів було прийнято рішення що компанія буде працювати із промисловими компаніями.					

В результаті аналізу потенційних груп споживачів (табл.4.14) були обрані цільові групи, для яких будемо пропонувати свій прилад та визначили стратегію охоплення ринку: стратегію диференційованого маркетингу, тому що працюємо із конкретним сегментом, розробляючи для нього програму ринкового впливу. Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (табл.4.15).

Таблиця 4.12.

Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1.	Підсилення сильних сторін стартапу за рахунок ринкових можливостей	Диференційований маркетинг	Якісний пристрій який має підтримку клієнтів завдяки своєчасному зворотному зв'язку а отже і повагою до покупців.	Стратегія диференціації

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16). В даному пункті проведено аналіз конкурентної поведінки основних гравців на ринку вимірювального обладнання що володіє функціоналом подібним до розробленого приладу. Встановлено, що конструктивні рішення найближчих аналогів основних виробників є подібними за основними конструктивними рішеннями, але відрізняються технологією виготовлення.

Таблиця 4.13.

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
	ні	Планується розвиток ринку	Ні, не буде. Буде утворено унікальну лінійку продукції	Зайняття конкурентної ніші

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування яка визначається у формування ринкової позиції, за якою споживачі мають ідентифікувати проект.

Таблиця 4.17.

Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
	Вдосконалення продукту враховуючи потреби та побажання споживачів	Стратегія диференціації	Висока якість продукту. Формування лояльності і прихильності споживачів, підтримка вхідних бар'єрів.	Якість. Ціна. Зворотній зв'язок із виробником. Технічна підтримка.

Результатом даного підрозділу є система рішень щодо ринкової поведінки компанії, вона визначає в якому напрямі буде працювати компанія на ринок.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Дана стратегія дозволяє визначити ключові переваги продукту перед конкурентами. У таблиці 4.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.14.

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
	Контролювати часток у газових викидах промислових підприємств	Отримання результатів про часточки у газових викидах	Постійна технічна підтримка. Безперебійна робота приладу.

Таблиця 4.15

Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	1. Створення приладу для визначення відносних концентрацій пилових частинок у викидах промислових підприємств на основі оптично-адсорбційного методу контролю із 2-канальною схемою включення. Можна виділити наступні вигоди використання: <ul style="list-style-type: none">Висока швидкодія вимірювального засобу за рахунок диференційної схеми зрівнянняМожливість монтування даної вимірювальної систему у вже готові рішення систем відтоку викидів на промислових підприємствах.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Довговічність (немає строку давності)	Нм	Тх
	2. Гарантійний термін (довгий термін гарантійного обслуговування)	Нм	Е
	3. Досконалість виробничого виконання (Ергономічний дизайн)	Нм	Тл
	4. Вартість обслуговування (Низька вартість обслуговування)	Нм	Вр
	Якість: відповідає нормам ДСТУ 2603-94 Аналізатори газів для контролю викидів промислових підприємств		
Пакування: складові частини вимірювача пакуються в транспорту тару та додається програмне забезпечення записане на компакт диск.			
Марка: отримання торгової марки планується після сертифікації виробу в Укрметртестстандарті після проведення тестових випробувань на підприємствах			
III. Товар із підкріпленням	До продажу користувач може запросити до себе спеціаліста та протестувати прилад, провівши на ньому ряд необхідних досліджень протягом одного робочого дня.		
	Після продажу один раз в квартал клієнта буду відвідувати спеціаліст для налаштування, калібровки, усунення несправностей, та неточностей у роботі приладу.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: надання кожній проданій копію індивідуального ліцензійного коду який необхідно вводити при запуску приладу.			

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 4.20).

Таблиця 4.16

Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	250 000 – 350 000 грн.	286 700 – 312 690 грн.	10 млн. – 50 млн. грн.	170 000 – 200 000 грн.

Формування системи збуту вимірювальної системи планується на основі розміщення інформації про розроблений товар на профільних ресурсах в мережі Інтернет та розповсюдженням рекламної продукції у паперовому вигляді

Таблиця 4.17.

Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Єдино разова купівля товару (з продовженням терміну експлуатації програмного забезпечення)	Своєчасна доставка товару клієнту, його встановлення та налаштування.	Канал збуту нульового рівня	Мережа інтернет

Таблиця 4.18.

Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Необхідність контролю твердих часток у газових викидах	Мережа інтернет, виставки, семінари, друкована продукція.	Спеціалізовані виставки вимірювального обладнання, реклама в буклетах промислового обладнання для профільної галузі.	Проінформувати клієнта про те, що за допомогою приладу стає можливим швидке та надійне визначення твердих часток у газових викидах	Чисте повітря – твоє здоров'я! Зроби планету чистішою!

Результатом даного підпункту є ринкова програма яка включає концепцію збуту, просування, аналіз ціноутворення, вона залежить від цінностей та потреб потенційних клієнтів, переваги ідеї, стан ринку на якому буде впроваджено проект на даний момент та його динаміку, та відповідну обрану альтернативу поведінки на ринку.

Висновки до розділу 4

Узагальнюючи проведений аналіз стартап проекту можна зробити висновок що стартап проект «Інформаційна вимірювальна технологія контролю твердих часток у газових викидах промислових підприємств» що проект буде потенційний клієнтом і має позитивну можливість ринкової комерції.

З огляду на потенційні групи клієнтів перспективи впровадження проекту є дуже високими. Але за рахунок того, що на ринку вже є присутні аналоги продукту який розробляється бар'єр входження на ринок є досить високим.

Проаналізувавши ринкову модель виробництва та реалізації розробленого у рамках наших досліджень вимірювача, можна судити про те, що в теперішньому вигляді наш продукт має значні цінові переваги, але мінливість ринку змушує нас працювати над його покращенням а саме:

1. Надання якісного сервісу підтримки з технічних питань нашим клієнтам, що позитивно вплине не тільки на імідж компанії а й на майбутніх покупців що завдяки нашому ставленню закріплять нас на ринку товарів даної галузі.

2. Покращити розроблений метод контролю твердих часток у газових викидах, що призведе не тільки до підвищення конкурентоспроможності.

3. Так як наш проект не відомий на ринку потрібно зайнятися його рекламною кампанією серед потенційних покупців. Надати можливість проведення тестових вимірювань приладом на протязі серії робочих днів на виробництві замовника.

4. До моменту розроблення нами власної торгівельної та транспортної мережі доцільно буде використовувати мережу інтернет для реклами та прийому замовлень на вимірювач, розроблений в рамках нашого стартап проекту, що дасть клієнтам можливість знайти про нас необхідну інформацію та дасть нам змогу заявити про себе на українському та міжнародному ринках.

ВИСНОВКИ

1. Зроблено аналіз літературних джерел по темі магістерської роботи.
2. Проведено аналіз характеристик хімічних, фізичних та фізико-хімічних методів діагностики інформативних показників твердих часток атмосферного повітря, визначено їх переваги та недоліки.
3. Проведено аналіз проблеми реєстрації електромагнітного випромінювання вибраного спектрального діапазону та сучасних методик й засобів реєстрації електромагнітного випромінювання з використанням фотодіодних первинних перетворювачів.
4. Досліджено фактори, які визначають похибку вимірювань параметрів світлового потоку первинним перетворювачем та формування сигналу вимірювальної інформації в аналоговій формі на його виході.
5. Визначення функції перетворення вимірювального макету та проведено апробацію макету вимірювальної установки із напівпровідниковим фотодетектором придатним для визначення оптичних характеристик твердих часток атмосферного повітря та потужних світлодіодів у якості джерел освітлення для використання в спектроскопії видимої області спектру.
6. Застосовано спеціальний блок випромінювача розробленого приладу, проведено його метрологічне забезпечення. Розроблено макет та розраховано його економічну доцільність. При $(m - m_0) = 1,2$ мг похибка вимірювання концентрації пилу становить $\pm 20\%$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Александров Н.Н., Гунія Г. С., Коньков С.Л. У кн.: Захист атмосфери від забруднень. Вип. 2. Методи визначення забруднень атмосфери. Вільнюс,. Ін-та фіз. і матем. АН ЛітССР, 1974, с. 135–142.
2. Алієв Г. М. Пиловловлення у виробництві вогнеопорів. 2-е видання М.: Металургія, 1981. 184 с.
3. Алієв Г. М.–А. Експлуатація апаратів і систем пиловловлення на вогнетривких заводах. М.: Металургія, 1977. 288 с.
4. Алієв Г. М.–А., Гонік А.Е. Прилад для вимірювання питомого електричного опору промислових пилів "Циклоном-1" М.: ГосІНТІ, 1968. с. 1–3.
5. Алієв Г. М.–А., Шловидов Ю. З, Ткаченко В. М. і ін.– У кн.: Електричне очищення газів. М.: Енергія, 1968, с. 75.
6. Алієв Г. М.–А., Гонік А. Е. Електроустаткування й режими живлення електрофільтрів. М.: Енергія, 1971. 264 с.
7. Балтренас, П. Б. Методы и приборы определения физикомеханических свойств пылей и аэрозолей [Текст] / П. Б. Балтренас, В. Шпакаускас. — Вильнюс: Техника, 1994. — 237 с.
8. Булгакова І. Т., Зеликсон Д. Л. Промислова й санітарна очистка газів (Оглядова інформація, Сір. ХМ–14). М.: Цинтихімнефтемаш, 1979. 37 с.
9. Вартанов, А. З. Методы и приборы контроля окружающей среды и экологический мониторинг [Текст] / А. З. Вартанов, А. Д. Рубан, В. Л. Шкурятник. — М.: Горная книга, 2009. — 640 с.
10. Вовна, А. В. Методы и средства аналитического измерения концентрации газовых компонент и пыли в рудничной атмосфере угольных шахт [Текст] / А. В. Вовна и др. — Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. — 260 с.
11. Защепкіна Н.М. Проблема впливу виробничого пилу на організм людини /Защепкіна Н.М., Смирнов М.Ю.// Матеріали XVII Міжнародної науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». — К.: НТУУ "КПІ".— 15-16 травня 2018 р.
12. Защепкіна Н.М. Контроль пилопроникності матеріалу від дії автомобільного пилу/Защепкіна Н.М., Мелконян А.А.// Наукові нотатки, Луцьк - 2018. Вип..62 – С.122-125.
13. Зоном І. П. – Гігієна населених місць, 1975, вип. 14.
14. Ізмайлов Г. А. "Приладобудування", 1959, № 7, с. 16–18.
15. Клименко А.П. і ін. Безперервний контроль концентрації пилу/ А.П.Клименко, В.І. Корольов, У.І Шевцов. — К.: Техніка, 1980. — 181с.
16. Коузов П. А., Скрябіна Л. Я – Методи визначення фізико – хімічних властивостей промислових пилів. М.: Хімія, 1983. 143 с.

17. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пил и измельченных материалов. М.: Химия, 1971. 280 с.
18. Кудряшов В. В., Химченко В. Ф. У кн.: Вивчення фізико-хімічних властивостей пилу й можливості їх використання з метою пиловловлення. М., Ін-та гірничої справи ім. А.А. Скачинського, 1970, с. 40–46.
19. Леончик В.І., Малкін В. П. Вимірювання в дисперсних потоках. М., "Енергія", 1971. 248 с.
20. Максименко, Ю. Н. Переносной оптический пылемер ВОГ-2 [Текст] / Ю. Н. Максименко, Е. Г. Мазан, А. К. Тимин // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2010. – Вип. 40. – С. 81–86.
21. Матраков Б. І., Лебі Е. І. Вимірювальна техніка, 1974, № 5, с. 14–16.
22. Склад пилогазових шкідливостей, що викидаються печами склоробного виробництва / В.М. Тарасов, М.А. Розенбаум, Е.Г. Левков, В.І. Грацай, В.І. Звягінцев, В.К. Гончаренко. – Промислове й санітарне очищення газів, 1975, №5.
23. Скрыбин Г. М. – Промислове й санітарне очищення газів, 1976, № 4, с. 47.
24. Соломічев Р. І. Розробка та обґрунтування структури вимірювальної системи контролю вибухонебезпечних пило-газових сумішей в шахтному виробітку /Р. І. Соломічев, О. В. Вовна, А. А. Зорі // Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – Харків, 2014. – № 19 (1062). – С. 154 – 163. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Кругер М.Я. и др., 1967г., 760с.
25. Справочник по пыле- и золоулавливанию./ М. И. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков и др... Под общ. Ред. .А. А. Русанова.-2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 2003. - 312с.
26. Страус В. Промислове очищення газів: Пер. с англ. М.: Химия, 1981. 616 с.
27. Трубицын А. А. Разработка прибора контроля запыленности воздуха ПКА-01 для предприятий угольной промышленности / А. А. Трубицын, Д. Н. Козлов, А. Ю. Ермаков // Взрывное дело. – 2005. – Вып. № 95/92. – С. 121 – 129.
28. Шифрін К.С. Розсіювання світла в мутному середовищі. М., Гостехиздат, 1981. 288 с.